



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**OPTIMALIZACE VZDUCHOVÁNÍ FOTOBIOREAKTORU ZA  
POMOCI ANALÝZY OBRAZU**

PHOTOBIOREACTOR AERATION OPTIMIZATION USING IMAGE ANALYSIS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Kryštof Hruška**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Martin Nad', Ph.D.**

**BRNO 2021**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství  
Student: **Bc. Kryštof Hruška**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Procesní inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Martin Nadř, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Optimalizace vzduchování fotobioreaktoru za pomoci analýzy obrazu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedním z využití řasy v bioreaktoru je čištění spalin. Řasy jsou tedy v trubici probublávané spalinami, přičemž na základě použitého vzduchovacího elementu, rychlosti vstupujících spalin a dalších klíčových parametrů se tvoří bubliny o různé velikosti. Za pomoci obrazové analýzy je proto potřebné vyhodnotit bubliny, navrhnout vhodný vzduchovací element a optimalizovat velikost bublin.

Velikost bublin je klíčový parametr při filtrování spalin v bioreaktoru. V případě příliš malých bublin hrozí jejich imploze a následné poškození řasy. Při zachování průtoku spalin a malé velikosti bublin narůstá rychlost tvorby pěny. Naopak příliš velké bubliny zas v uzavřené trubici vytvoří jev tzv. píšť a vytlačí médium ven z trubice.

### Cíle diplomové práce:

Úvod do problematiky bioreaktorů  
Úvod do problematiky automatické analýzy obrazu  
Analýza a optimalizace bublin

### Seznam doporučené literatury:

TORZILLO, G. & CHINI ZITTELLI, G.. Tubular Photobioreactors. 10.1007/978-3-319-20200-6\_5, 2015.

MOSER, A. Tubular bioreactors: Case study of bioreactor performance for industrial production and scientific research. Biotechnology and Bioengineering [online]. 1991, 37(11), 1054-1065 [cit. 2020-1-23]. ISSN 0006-3592. Dostupné z: doi:10.1002/bit.260371111

HON-NAMI, K., KUNITO, S. Microalgae cultivation in a tubular bioreactor and utilization of their cells. Chin. J. Ocean. Limnol. 16, 75–83 (1998). <https://doi.org/10.1007/BF02849084>

BAHADUR, A., ZUBAIR, M. a M. B. KHAN. Design, construction and evaluation of solarized airlift tubular photobioreactor. Journal of Physics: Conference Series [online]. 2013, 439 [cit. 2020-10-23]. ISSN 1742-6596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/439/1/012036

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



## **Abstrakt**

Tato diplomová práce shrnuje poznatky o mikrořasách, jejich využití, metodách kultivace a překážkách, které brání jejich většímu rozšíření. V praktické části práce bylo navrženo, zkonstruováno a naprogramováno zařízení, jež dokáže analyzovat bubliny trubicového fotobio-reaktoru a na základě získaných dat řídit jeho vzduchování. K vytvoření programu byl použit programovací jazyk Python a k analýze fotografií byla využita knihovna OpenCV. Detekce bublin probíhá na základě detekce hran a jejich následném třídění. Data získaná z analýzy jsou zobrazována na obrazovce zařízení a uchovávána v csv souboru. V diskuzi práce jsou uvedena možná vylepšení a poznatky získané během vytváření tohoto zařízení.

## **Klíčová slova**

fotobioreaktor, detekce bublin, OpenCV, mikrořasy, obrazová analýza, Python, detekce hran

## **Abstract**

This diploma thesis summarizes the knowledge about microalgae, their use, cultivation methods and obstacles that prevent their wider use. In the practical part of the work, a device was designed, constructed, and programmed. This device can analyze the bubbles of the tubular photobioreactor and, based on the obtained data, control its aeration. The Python programming language was used to create the program and the OpenCV library was used to analyze the photographs. The bubble detection is based on the edge detection and the subsequent refinement. The data obtained from the analysis are displayed on the device screen and the data are also stored in a csv file. The discussion lists possible improvements and lessons learned during the creation of this device.

## **Keywords**

photobioreactor, bubble detection, OpenCV, microalgae, image analysis, Python, edge detection



## **Bibliografická citace**

HRUŠKA, Kryštof. Optimalizace vzduchování fotobioreaktoru za pomoci analýzy obrazu. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132630>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Martin Nadř.



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Optimalizace vzduchování fotobioreaktoru za pomoci analýzy obrazu* vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně, dne 20. května 2021

---

*podpis autora*



## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval svým rodičům, kteří mi umožnili studium na vysoké škole a po celou dobu mě podporovali. Dále bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Nađovi, PhD. za cenné rady, čas a především zajímavé téma a skvělý přístup. Velké díky patří také největší motivátorce Vendulce, jež mi navíc ochotně pomáhala s montáží.





# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Mikrořasy</b>	<b>2</b>
1.1 Uplatnění mikrořas . . . . .	3
1.2 Faktory ovlivňující růst řas . . . . .	4
1.2.1 Zdroj uhlíku . . . . .	4
1.2.2 Živiny . . . . .	5
1.2.3 Světlo . . . . .	5
1.2.4 Teplota . . . . .	6
1.2.5 pH . . . . .	6
<b>2 Kultivační zařízení</b>	<b>7</b>
2.1 Otevřené systémy . . . . .	7
2.2 Uzavřené systémy . . . . .	8
2.3 Limity mikrořas . . . . .	10
<b>3 Koncept práce</b>	<b>11</b>
3.1 Fyzikální vlastnosti bublin . . . . .	12
<b>4 Konstrukce zařízení</b>	<b>13</b>
4.1 Sestavování zařízení . . . . .	15
<b>5 Obrazová analýza</b>	<b>19</b>
5.1 Jak detekovat bubliny . . . . .	19
5.2 Obraz . . . . .	19
5.3 Python knihovny pro zpracování obrazu . . . . .	21
5.4 Testované možnosti a metody pro nalezení bublin . . . . .	21
5.4.1 Zjednodušení obrazu . . . . .	22
5.4.2 Histogram . . . . .	22
5.4.3 Prahování . . . . .	23
5.4.4 Morfologické operace . . . . .	24
5.4.5 Detekce hrany . . . . .	25
5.4.6 Rozpoznávání elips . . . . .	28
5.5 Aplikace na modelovém příkladu . . . . .	28
5.5.1 Vybrání vhodných elips . . . . .	29

<b>6</b>	<b>Vytváření snímků</b>	<b>33</b>
6.1	Jak provést dvě fotky najednou . . . . .	33
6.1.1	Propojení dvou Raspberry Pi . . . . .	33
6.2	Jak získat vhodnou fotografii . . . . .	34
6.2.1	Expozice . . . . .	34
6.2.2	Výběr optimálních parametrů . . . . .	35
<b>7</b>	<b>Výsledný program</b>	<b>40</b>
7.1	Uživatelské grafické rozhraní . . . . .	41
7.2	Postup programu . . . . .	42
7.2.1	Focení . . . . .	42
7.2.2	Odečet vs výřez . . . . .	43
7.2.3	Detekování elips . . . . .	44
7.2.4	Vykreslení bublin . . . . .	49
7.2.5	Zobrazování a uchovávání dat . . . . .	51
7.2.6	Regulace . . . . .	52
<b>8</b>	<b>Diskuze</b>	<b>55</b>
<b>9</b>	<b>Závěr</b>	<b>56</b>
	<b>Literatura</b>	<b>57</b>
	<b>Seznam symbolů a zkratek</b>	<b>61</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>62</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>63</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>65</b>

# Úvod

Lidská populace zažívá v posledních 70 letech nebývalý růst. Od roku 1950 do roku 2020 se světová populace ztrojnásobila [1]. To samozřejmě vedlo ke zvětšení spotřeby primárních zdrojů a následně i otázce udržitelnosti. V posledních letech se lidé čím dál tím více zabývají touto otázkou jak v energetickém, zemědělském tak i potravinovém průmyslu. Ve svém článku J. Watts [2] shrnuje, že zemědělství a rybolov jsou jedny z hlavních příčin environmentálních problémů. Například masný průmysl vytváří až 18 % celosvětových emisí skleníkových plynů a pastviny tvoří asi 25 % světové půdy bez ledu. Rostlinná výroba využívá 12 % půdy a vytváří necelých 7 % emisí. Zemědělství má dále vliv na degradaci a erozi půdy, ztrátu biologické rozmanitosti, znečišťování vody, odlesňování a jiné. Největším zdrojem emisí je však energetika (zejména: výroba elektřiny, tepla, transport) [3], která tvoří až 73 % všech emisí. Například EU se zavázala alespoň k 27% podílu energie z obnovitelných zdrojů do roku 2030, což zahrnuje biopaliva. V této souvislosti EU stanovila strop ve výši 7 % na konečnou spotřebu biopaliv vyrobených ze zemědělských plodin ve prospěch pokročilejších biopaliv, která nejsou vyrobena z potravinářských a krmných plodin [4].

Malou součástí řešení by mohlo být využití mikrořas. Tyto prastaré jednoduché organismy dokáží při dostatku živin využívat sluneční energii pro budování svých těl. Jejich fotosyntéza je účinnější než u suchozemských rostlin, což ústí v jejich vyšší rychlost růstu. Jejich biodiverzita je obrovská, a mohou proto být zdrojem různorodých cenných látek. Pěstování mikrořas nevyžaduje úrodnou půdu a mohou být zakomponovány do průmyslových celků, kde mohou zachytávat oxid uhličitý, či využívat zbytkové dusičnany a fosfáty. Tímto mohou redukovat odpadní látky, čistit spaliny, odpadní vody a zároveň produkovat biomasu i kyslík. Mikrořasy mají proto potenciál v mnohých odvětvích, od potravinářství a krmiv, po výrobu biopaliv 3. a 4. generace, dokonce nacházejí využití ve farmaceutickém průmyslu.

Ačkoliv jsou mikrořasy pěstovány již po dlouhou dobu, stále se jedná o oblast, kde lze dosahovat značných zlepšení. Produkce mikrořas se již využívá pro komerční účely, převážně však jako doplňky stravy, krmiva a jako zdroj specifických látek. Nicméně ještě nedokáže cenově konkurovat biomase ze suchozemských rostlin. Je nutné se proto věnovat tomu, aby byl zefektivněn proces kultivace i zpracování mikrořas, aby jejich obrovský potenciál mohl být využit.

# 1

## Mikrořasy

Termínem mikrořasy se označují prokaryotní sinice i eukaryotní řasy - jednobuněčné i vláknité kmeny, jejichž velikost je v řádu mikrometrů. Mikrořasy jsou jedny z nejstarších mikroorganismů, které začaly tvořit kyslíkatou atmosféru Země. Tyto organismy provozují fotosyntézu a metabolické pochody stejně jako vyšší rostliny, ale díky účinnější fotosyntéze, jejich jednoduchosti a krátkým reprodukčním cyklům mají vyšší rychlost růstu a přisuzuje se jim až polovina globální primární fotosyntetické produkce. Mikrořasy jsou rozšířené ve všech hlavních ekosystémech a rostou i v extrémních podmínkách pouště i polárních oblastí. Díky jejich různorodosti mohou být zdrojem různých látek, od surové biomasy bohaté na bílkoviny, oleje, polysacharidy a antioxidanty až po cenné sekundární metabolity s potenciálním využitím v medicíně. [5]

Mikrořasy jsou skvělým zdrojem potravy a přírodních antibiotik. V zemích, kde jsou příznivé podmínky pro jejich růst, jako je například Mexiko, Čad či Barma, se už odedávna přírodní populace mikrořas využívaly jako potravní doplněk i léčebný prostředek. Průmyslová kultivace mikrořas začala v šedesátých letech minulého století v Japonsku, kde *Chlorella* byla používána jako přísada do potravin. [6] S cílem zajistit náhradu jiných zdrojů bílkovin byla v sedmdesátých až osmdesátých letech zahájena velkoobjemová produkce mikrořasy *Arthrospira* (*Spirulina*) v Mexiku, USA, Thajsku, Jihoafrické republice a Číně. Tato produkce se odehrávala převážně v otevřených nádržích a využívala se pro přípravu potravinových doplňků a krmiv. Dalšími příklady je pěstování řasy *Haematococcus* pro astaxantin na Havaji nebo mikrořasy *Dunaliella* pro  $\beta$ -karoten v Austrálii. [5]

Ačkoliv je známo více jak 50 000 druhů mikrořas [7], většina světové produkce biomasy mikrořas (přes 35 000 tun) pochází jen z několika rodů (*Arthrospira*, *Chlorella*, *Dunaliella*, *Nannochloropsis* a *Haematococcus*). Nejdůležitějšími parametry, podle kterých jsou vhodné kmeny vybírány, jsou: rychlost růstu, schopnost přizpůsobit se podmínkám kultivačních systémů a především vysoké obsahy chtěných látek. Některé kmeny mikrořas se pěstují v menších množstvích i na úkor vyšších nákladů v uzavřených systémech, které poskytují specifické prostředí a zaměřují se na produkci cenných látek. Dvě nejvíce pěstované jsou popsány v následujících dvou odstavcích. [5]

### ***Arthrospira* (*Spirulina*)**

Je označována za superpotravinu díky jejímu nutričnímu profilu [8]. Její biomasa se převážně využívá jako zdroj zdravé výživy, doplněk krmiv pro domácí zvířata a ryby nebo ve farmaceutickém a kosmetickém průmyslu. Výhodou je snadná stravitelnost, neboť buňky nemají celulózní stěnu. Je pěstována pro její vysoký obsah bílkovin (~55-70 %), dále jsou v biomase obsaženy polysacharidy (~19 %) a lipidy (~5-6 %). Doporučenými podmínkami pro pěstování

jsou teploty okolo 35 °C a pH mezi 9-10. [5]

## Chlorella

Její využití je podobné jako u *Arthrospira*. Obsahuje sice o něco méně proteinu (~50-55 %), ale má poměrně vysokou teplotní toleranci 15 až 40 °C a vyznačuje se vysokou rychlostí růstu. Dále obsahuje polysacharidy (~10-15 %) a lipidy (~10-15 %). Při stresových podmínkách (např. nedostatek živin) některé kmeny *Chlorelly* zvyšují podíl polysacharidů a lipidů, čehož může být využito při výrobě biopaliv. [5]

## 1.1 Uplatnění mikrořas

Mikrořasy nacházejí uplatnění v širokém spektru komerčních produktů, které se stále rozrůstá. Produkují vitamíny, které zvyšují jejich hodnotu nutričně bohaté potraviny. Dále se z nich získávají různé pigmenty jako například: chlorofyl,  $\beta$ -karoten a další karotenoidy, phytoproteiny a astaxanthin. Tyto pigmenty se využívají při terapiích neuronálních poruch a očních onemocněních. Jejich produkce esenciálních aminokyselin zvyšuje jejich potenciál pro využití jako potraviny bohaté na bílkoviny, kterých mohou obsahovat vysoké množství. [9]

Aktuálně se průmyslová kultivace nejvíce využívá k produkci krmiva, potravin a kosmetických a farmaceutických produktů. Využití řas souvisí s jejich složením, které závisí na druhu a podmínkách růstu.

### Mikrořasy jako potravina

Mikrořasy jsou nutričně velmi bohaté, kromě základních třech složek proteinů, polysacharidů a lipidů obsahují aminokyseliny, nukleové kyseliny, pigmenty, antioxidanty, vitamíny a další. Pro lidskou konzumaci jsou většinou dodávány ve formě tablet, či prášků. Zároveň se využívají jako nutričně bohatý doplněk krmiv. Například karotenoid astaxantin získávaný z řasy *Haematococcus* se používá jako přídatek ke krmivu lososů a pstruhů, díky němuž získávají lososovou barvu. [5]

### Mikrořasy ve farmaceutickém a kosmetickém průmyslu

Jelikož se různé druhy mikrořas musely upravit mnoha nehostinným podmínkám, mohou obsahovat různorodé obranné přírodní látky, jež mohou lidé využít. Například schopnost produkovat toxiny, které mohou být nebezpečné i pro člověka, je testována a využívána u protinádorových léčiv. [10]

Pigmenty zlepšují účinnost fotosyntézy (fykobiliny<sup>1</sup>) rostlin a chrání je před slunečním zářením (karotenoidy<sup>2</sup>). Například  $\beta$ -karoten se využívá ve zdravé výživě jako prekurzor vitamínu A. Lutein, zeaxantin a canthaxantin nacházejí uplatnění v kosmetickém i farmaceutickém průmyslu (také se používají pro zbarvení kuřecí kůže). [10]

1 jsou fotosyntetická barviva sloužící jako přenašeči světelné energie ke chlorofylu

2 barviva rostlin, jež nenapomáhají fotosyntéze a chrání fotosyntetický aparát rostlin před poškozením a mají výrazné antioxidační účinky

V kosmetickém průmyslu se používají pro kožní přípravky z důvodu obsahu aminokyselin, nukleových kyselin, vitamínu E, lipidů a antioxidantů, jenž mají regenerační, vyživující a hydratační účinky. [5]

S kontrolovanými podmínkami kultivace mohou být zdrojem stabilních izotopů (uhlíku, dusíku a vodíku) z anorganických zdrojů. Různé stabilní izotopy lze využít k vědeckým účelům jako jsou výzkumy molekulární struktury nebo fyziologické pokusy. Nacházejí uplatnění také pro klinické účely jako jsou gastrointestinální nebo dechové diagnostické testy. [11]

### **Mikrořasy jako biopaliva**

V posledních dvou desetiletích se téma produkování biopaliv stalo velmi rozvíjeným tématem s cílem nahradit drahá a ubývající fosilní paliva. Na základě několika velmi citovaných prací, které podávaly nerealisticky optimistické výsledky, bylo velké očekávání o masové výrobě biopaliv z mikrořas. Například práce od Y. Chisti [12], která má přes 6 000 citací kupříkladu uváděla: „50 % paliva využívaného pro dopravu v USA může být pěstováno na dvou milionech hektarů půdy“, nebo „biopaliva z mikrořas mohou kompletně a udržitelně nahradit všechny paliva získávané z ropy“. Práce stojí na předpokladech produkce mikrořas 340 dní v roce, 70% hmotnostní obsah lipidů a produkce 50 až 460 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>. V další hojně citované práci od Q. Hu [13] byl špatně interpretován potenciál využití lipidů z řas. V práci bylo uvažováno, že všechny extrahované lipidy jsou ekvivalentní s chtěnými triglyceridovými lipidy<sup>3</sup>. Tyto i další práce sice vzbudily přehnaná očekávání, ale zároveň se i díky nim výzkum v posledních letech výrazně zrychlil. [14]

O mikrořasách se mluví jako o biopalivech třetí generace. Díky jejich rychlosti růstu mají vysokou účinnost fixace oxidu uhličitého a vysokou produkci biomasy. Z olejů a škrobu obsažených v mikrořasách lze získávat bio-diesel, bio-ethanol a fermentací bioplyn. Termochemickými metodami lze biomasu mikrořas zpracovat na olej, nebo syngas (CO a H<sub>2</sub>). V určitých případech lze získávat i bio-vodík. [5]

## **1.2 Faktory ovlivňující růst řas**

Jedním z neklíčovějších úkolů však stále zůstává kultivace řas ve velkém množství a při nízkých nákladech. K tomu se váže výběr otevřeného či uzavřeného systému, optimalizace provozních podmínek k maximalizaci zisku poměru chtěné látky a množství biomasy a výběr samotného kmene mikrořasy. [15]

### **1.2.1 Zdroj uhlíku**

Zdroj uhlíku je často nejvíce kritickým faktorem pro růst mikrořas. Ty mohou být pěstovány ve fotoautotrofních, heterotrofních či mixotrofních podmínkách za použití různých zdrojů uhlíku. Ten může pocházet z oxidu uhličitého, glukózy, methanolu, acetátu nebo jiné organické sloučeniny. Fotoautotrofní kultivace znamená, že organismus využívá neorganický uhlík,

---

<sup>3</sup> jsou glyceridy, kde je glycerol esterifikován se třemi mastnými kyselinami. Jsou hlavní složkou rostlinných olejů a živočišných tuků. (jsou též známy pod jménem Triacylglyceroly či zkratkou TAG)

například z oxidu uhličitého, a syntetizují z něj uhlíkaté řetězce skrz fotosyntézu. Pokud mikrořasy získávají uhlík z organických látek, jsou nazývány heterotrofními. Proces může probíhat v nepřítomnosti světla i v jeho přítomnosti. Nejčastějším způsobem je ovšem pěstování řas, kdy získávají uhlík z oxidu uhličitého, či hydrogenuhlíčanů. Jelikož oxid uhličitý je považován za nežádoucí produkt mnoha lidských činností, je z hlediska redukování jeho emisí nasnadě využití odpadních nežádoucích plynů z elektráren či jiných industriálních zařízení k produkci biomasy. A jak již bylo zmíněno, mikrořasy mají lepší (až padesátinásobné) fixační poměry oxidu uhličitého než běžné rostliny. Právě z tohoto důvodu se mikrořasy jeví jako lepší zdroj pro biopaliva, než například řepkový olej, či dřevní plyn. Heterotrofní řasy rostou většinou rychleji než fotoautotrofní, z ekonomických důvodů nejsou ovšem tak perspektivní, neboť potřebují ke svému růstu jinou biomasu. Tento problém není například u čističek odpadních vod, kde tyto řasy nachází rozsáhlé uplatnění. [15]

### 1.2.2 Živiny

Řasy potřebují ke svému růstu také živiny, jako jsou dusičnany, fosfáty, železné soli a další. Obvykle se anorganický dusík a fosfor absorbují jako dusičnany a fosfáty. Jejich efektivní alternativou může být používání močoviny. Prvky jako Mo, K, Co, Fe, Mg, Mn, B a Zn jsou vyžadovány pouze ve stopovém množství, ale mají silný vliv na růst mikrořas, protože ovlivňují mnoho enzymatických aktivit v buňkách řas. [9] Množství dostupných živin má výrazný dopad na rychlost růstu. Právě limitace dusíku (živin) je nejčastější metodou pro nastolení stresových podmínek, na které mikrořasy reagují vytvářením většího množství lipidů (olejů), v některých případech i sacharidů. Organismy přeměňují proteiny na energeticky bohatější látky (lipidy, sacharidy), aby si uchovaly energii a přežily tak nepříznivé období. V případě využívání řas pro výrobu biopaliv je právě vysoký obsah lipidů nejdůležitější, ale ačkoliv je limitace dusíku pro zvýšení obsahu lipidů velmi účinná (může zvednout jejich obsah až o 20 %), nedostatek živin vede ke snížení rychlosti růstu, a může tak mít ve výsledku negativní dopad na celkovou produkci. Je tedy důležité optimalizovat přísun živin a přesně plánovat doby růstu a nastolení stresových podmínek. [15]

### 1.2.3 Světlo

Intenzita a druh světla je kritickým faktorem pro růst mikrořas. Doba a intenzita světla přímo ovlivňují fotosyntézu a mají dopady na složení mikrořas. K maximalizaci produkce řas je potřeba dostat světlo ke všem řasám v dostatečné míře. To není jednoduché, neboť světelná intenzita se se zvětšující hloubkou zmenšuje, zejména pokud je koncentrace řas vysoká. Je proto důležité míchání kultury, aby byla zajištěna dostatečná ozářenost buněk, a zároveň používání takové konstrukce, při níž světlo bude ozařovat co největší plochu objemu. [15]

Při velmi nízké a velmi vysoké intenzitě světla nemohou mikrořasy účinně růst. Optimální intenzitu světla je třeba stanovit experimentálně, aby se maximalizovala asimilace oxidu uhličitého s minimální rychlostí fotorespirace<sup>4</sup> a co nejmenší fotoinhibicí<sup>5</sup>. Pro fotosyntézu řas je důležité střídání světla a tmy. A. Khoeyi, J. Seyfabadi a Z. Ramezanpour ve své práci [16]

4 tzv. světelné dýchání rostlin, je proces, při němž rostlina přijímá kyslík a produkuje  $\text{CO}_2$

5 je fyziologické poškození rostlin způsobené nadbytkem slunečního záření

experimentálně zkoušeli vliv intenzity a period střídání světla a tmy na růst mikrořas. Z jejich dat vyplývá, že maximálního výnosu biomasy bylo docíleno při střídání 16 hodin světla a 8 hodin tmy a intenzity světla  $62,5 \mu\text{mol} \cdot \text{foton} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Tyto hodnoty ovšem záleží na mnoha faktorech, jako je například míchání, koncentrace a hloubka kultury řas. [9]

Využití přírodního světla s sebou nese značné ušetření nákladů, a proto se většina produkce spoléhá na něj. Ovšem i pro velké komerční kultivace existují příklady, kde se využívá umělé osvětlení. Ty se buď využívají jako dodatečná osvětlení (firma Salata GmbH, Thüringen, Ritschenhausen, SRN), nebo dokonce jako výlučný zdroj světla v uzavřených fotobioreaktorech v biotechnologických halách, např. při kultivaci zelené mikrořasy *Haematococcus* pro získávání karotenoidu astaxantinu (firma AstaReal AB, Gustavsberg, Švédsko). [5]

### 1.2.4 Teplota

Každý druh mikrořas má svou specifickou optimální teplotu pro růst. Při odchýlení se od optimálních teplot může řasa přestat růst, či úplně zahynout. Pro většinu druhů se optimální teplota pohybuje okolo 20-30 °C [17], ovšem teplomilným řasám (například *Chaetoceros*) se daří při teplotě 40 °C a řasy zvyklé na růst v horkých pramenech mohou vyžadovat teplotu až 80 °C [18]. Hlídání teploty je především problémem otevřených systémů, kde je její regulace složitější a její výkyvy častější. Změna teploty je také jedním ze způsobů vytvoření stresových podmínek. Například *Chlorella vulgaris* produkuje více lipidů při 25 °C oproti teplotě 30 °C. [9]

### 1.2.5 pH

Dalším důležitým parametrem pro růst mikrořas je pH. Většině řas se daří při hodnotách pH v rozmezích od 6 do 8,76. Většina druhů je velmi pH senzitivní, ovšem existují i výjimky, mezi které se řadí již často zmiňovaná *Chlorella vulgaris*, jež dokáže růst i při hodnotách pH mezi 9 a 10.



## 2 Kultivační zařízení

Kultivační zařízení se primárně dělí na otevřené a uzavřené. Výběr vhodného zařízení je zásadní. Jeho výběr záleží především na druhu řas, požadavcích na výsledný produkt, klimatických podmínkách, ceně půdy, živin a vody. [15]

### 2.1 Otevřené systémy

Představují přírodní či umělé nádrže, oběžné náhony či kaskády nakloněných ploch. V těchto systémech mají mikrořasy přímý kontakt s okolním prostředím. Tyto systémy jsou výrazně levnější než uzavřené a to co se týče provozních i počátečních nákladů. Umožňují snadný odvod vznikajícího kyslíku, téměř se nepřehřívají a mají snadnou obsluhu. Míchání je zajištěno oběhovými čerpadly, rotujícími rameny, lopatkovými koly nebo bublání vzduchem. Existuje mnoho variant otevřených systémů, ty nejvíce využívané jsou představeny v následující části.

#### Kruhové systémy

Kruhové nádrže jsou jedním z nejstarších způsobů pro vysokoobjemové kultivování řas. Tyto nádrže jsou často používány v případě, kdy je pěstování řas spojeno s čištěním odpadních vod. V průměru mívají až 45 m a dosahují hloubky mezi 30 až 70 cm. Limitací těchto nádrží je jejich rozměr, neboť jakmile je jejich průměr moc velký, míchání se stává neefektivním. [19]

#### Traťové systémy

Oběžné traťové náhony jsou nádrže, kde voda proudí v uzavřených smyčkách zpravidla oválného tvaru. Hloubka se pohybuje mezi 15 až 30 cm a k oběhu vody jsou nejčastěji používána lopatková kola, která víří a pohybují řasou, aby ji exponovala slunečnímu záření. Rychlost proudění se zpravidla pohybuje od  $0,1$  do  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , vyšší rychlosti mohou být efektivnější, ale mohou spotřebovávat příliš energie. Tento typ kultivačních zařízení je nejpoužívanější pro komerční pěstování mikrořas. [19]

#### Tenkovrstvé kaskádové systémy

Další variantou jsou tenkovrstvé kaskádové systémy. Ty jsou konstruovány tak, aby se maximalizovala prosvětlenost v celém objemu. Konstrukce sestává z řady kaskád, kde je hloubka většinou menší než 1 cm a oběh je zajištěn čerpadly. Tímto lze dosáhnout vysokých hustot biomasy a tedy i velkých výnosů vztahených k objemu a ploše zařízení. [5]

## Výhody a nevýhody otevřených systémů [19]

Výhody otevřených systémů jsou následující:

- nízké náklady na produkci biomasy
- jednoduché rozšiřování kultivačního systému, neboť mohou být provozovány samostatně
- snadné zakomponování do systémů čištění odpadních vod

Otevřené systémy mají své nevýhody, mezi hlavní patří:

- snadná kontaminace jiným druhem divokorostoucí řasy, nebo jiným organismem, jenž převládne, nebo začne řasu požírat. Kultivace se proto musí omezit na krátkou dobu. Pouze několik druhů se osvědčilo pro otevřené systémy.
- nízká produktivita - konkrétní hodnoty se liší dle systémů a podmínek, je těžké dosáhnout hodnot 10 až 20 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup> (vždy však záleží na konkrétních podmínkách a druhu řasy)
- nízká hustota řas (0,6 až 1 g·l<sup>-1</sup>), která vede k nákladnému odvodňování
- odpařování vody (převážně v tropických oblastech)

## 2.2 Uzavřené systémy

Uzavřené systémy začaly být vyvíjeny pro zefektivnění kultivace mikrořas a k odstranění problémů, jenž jsou spojeny s otevřenými systémy. Hlavní výhodou je dosažení vyšší hustoty řas, protože se zde dají lépe nastavit optimální podmínky pro jejich růst (teplota, dostatek živin, pH, prosvětlenost). Dále je možné zamezit kontaminaci a tedy pěstovat větší škálu mikrořas, které navíc potřebují specifitější podmínky, jež otevřené systémy nemohou poskytnout. Investiční náklady jsou ovšem vyšší, stejně jako provozní náklady a náklady na údržbu. Cirkulaci kultury zajišťuje proud vzduchu, nebo čerpadla. Oběhová čerpadla nejsou vhodná, neboť poškozují řasy, proto se volí membránová, případně peristaltická<sup>1</sup>. Uzavřené systémy mohou mít mnoho konstrukčních řešení. Nejjednodušším fotobioreaktorem je osvětlený vak, jehož obsah je míchán pomocí proudu vzduchu obohaceného o oxid uhličitý. Nejčastější typy by se daly rozdělit do tří kategorií: trubkový, deskový a válcový. Všechny jsou tvořené průhlednými materiály a uspořádány tak, aby zachytávaly maximum světla. Fotobioreaktory se mohou přehřívat, proto je nutné je chladit, například pomocí tepelných výměníků. [5]

### Trubkový fotobioreaktor

Skládá se z průhledných trubic, které tvoří kultivační smyčku. Proudění je zajištěno pomocí čerpadla a provzdušňovacího systému. Celý systém lze rozdělit na dvě hlavní části, a to provzdušňovací a ozařovací. Provzdušňovací umožňuje absorpci oxidu uhličitého a zajišťuje odvod vyprodukovaného kyslíku. V této části se také odebírá vyprodukovaná biomasa. Druhou částí

---

<sup>1</sup> čerpadla pracují na principu flexibilní hadice, která je stlačována a kapalina nad místem stlačení je hnána vpřed

jsou samotné průhledné trubice, jejichž průměr je volen tak, aby byla celá vrstva prozářena. Jsou to nejběžněji využívané uzavřené systémy, neboť mají jednoduchou konstrukci, velký poměr povrchu k objemu a dobrou kontrolu nad prostupem vzduchu. Trubice mohou být uspořádány vertikálně, horizontálně, nakloněné nebo spirálovitě. [19]

Například rakouská firma Ecoduna postavila v roce 2018 největší vnitřní fotobioreaktor v Evropě, při kterém zvolila trubkový vertikální typ. Celková délka trubic dosahuje 230 km a zabírá plochu 10 000 m<sup>2</sup>. [20]

### **Deskový fotobioreaktor**

Systém je rozdělen podobně do dvou částí, jako je tomu u trubicového typu. Liší se ozařovanou (druhou) částí. Ta se skládá z obdélníkových průhledných desek, kde světlo proniká od 1 do 30 cm tlustou vrstvou. Vnitřní prostor může být rozdělen přepážkami a nejčastěji jsou míchány provzdušňováním. Deskový fotobioreaktor poskytuje dobrou prozářenost a světlo je rovnoměrně distribuováno. Tento typ konstrukce není příliš odolný vůči hydrostatickému tlaku, což limituje výšku těchto fotobioreaktorů. Levný deskový systém lze postavit za pomoci drátěného pletiva vyplněného průhledným plastovým vakem. [15]

### **Válcový fotobioreaktor**

Válcový fotobioreaktor je podobný trubkovému vertikálnímu systému. Na rozdíl od něj používá trubice o značně větším průměru a menší výšce, což výrazně snižuje investiční cenu, ovšem zhoršuje se prozářenost média. U těchto zařízení bývá využito i mechanické míchání, zpravidla lopatky otáčející se v ose válce.

### **Výhody a nevýhody uzavřených systémů [19]**

Výhody uzavřených systémů jsou následující:

- vyšší hustota řas oproti otevřeným systémům
- malé riziko kontaminace
- menší požadavky na prostor
- lze lépe ovlivňovat kultivační podmínky jako je teplota, světlo, pH a živiny
- nedochází k odpařování vody ze systému a je u nich lepší využití CO<sub>2</sub>, které může být snadno recyklováno

Uzavřené systémy mají své nevýhody, mezi hlavní patří:

- vysoké investiční a provozní náklady
- ulpívání řas a nečistot na transparentních plochách, což výrazně snižuje efektivní prozařování kultury
- nutnost chlazení a odvádění kyslíku, aby nedošlo k inhibici fotosyntézy

## 2.3 Limity mikrořas

Největším problémem řasových technologií pro jejich masové rozšíření je vysoká cena oproti pěstování pozemních rostlin. Bohužel je velmi těžké získat jakákoli konkrétní data z komerční sféry o nákladech a výnosech, či množství produkce z různých druhů zařízení pro pěstování mikrořas. International Energy Agency ve své zprávě z roku 2017 [14] uvádí několik hlavních překážek, jež musí být překonány k masové produkci mikrořas:

- Potřeba optimalizace produkce biomasy s ohledem na spotřebu energie, vody a živin. Například spotřeba vody se samozřejmě liší dle konstrukce systémů a podmínek, avšak pro příklad systém pěstující mikrořasy zhruba  $1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$  s obsahem zhruba 20 % lipidů v biomase určeného pro výrobu biopaliva, potřebuje okolo 5 000 l kultury mikrořas pro výrobu 1 kg biopaliva. Je velmi vhodné využívání odpadních vod, které snižují spotřebu sladké vody a zároveň již obsahují některé z potřebných živin.
- Zajištění zvýšení produktivity a odolnosti či přizpůsobení druhů řas k teplotám, sezónnosti a konkurenceschopnosti, například nepřímá úměra mezi množstvím vyprodukované biomasy a obsahu lipidů. V tomto směru se velké naděje upínají ke genetickému inženýrství a vyšlechtění nových druhů.
- Zkoumání fyzikálních, chemických, biologických a fyziologických variací a vlastností jednotlivých druhů řas, porozumět jim a dokázat jejich vlastnosti co nejlépe využít.
- Vývoj technologií pro efektivní zpracování řas na jednotlivé složky. Při biochemickém nebo jiném zpracování rozdělit biomasu na její tři hlavní složky - lipidy, sacharidy a bílkoviny a tyto složky pak jednotlivě zpracovávat. Tento přístup může výrazně zvýšit výtěžek z biomasy, nejvíce pak tam kde se využívá pouze lipidová frakce.
- Integrace očkování, kultivace a primární sklizně do jednoho systému. Aktuálně se většina startovacích kultur připravuje v laboratoři, a teprve pak se kultura přenesení do velkoplošné kultivace. Zároveň vyvinout systém předzpracování biomasy, aby se zpracování stalo ekonomičtější. Například dosáhnout co nejlevnějšího odvodnění biomasy.
- Podpora maximalizace recyklace dusíku, fosforu, uhlíku a dalších živin ze zbytkových materiálů zbývajících po předzpracování, nebo zpracování zbytků k minimalizaci požadavků na vstup čerstvého hnojiva do kultivace.

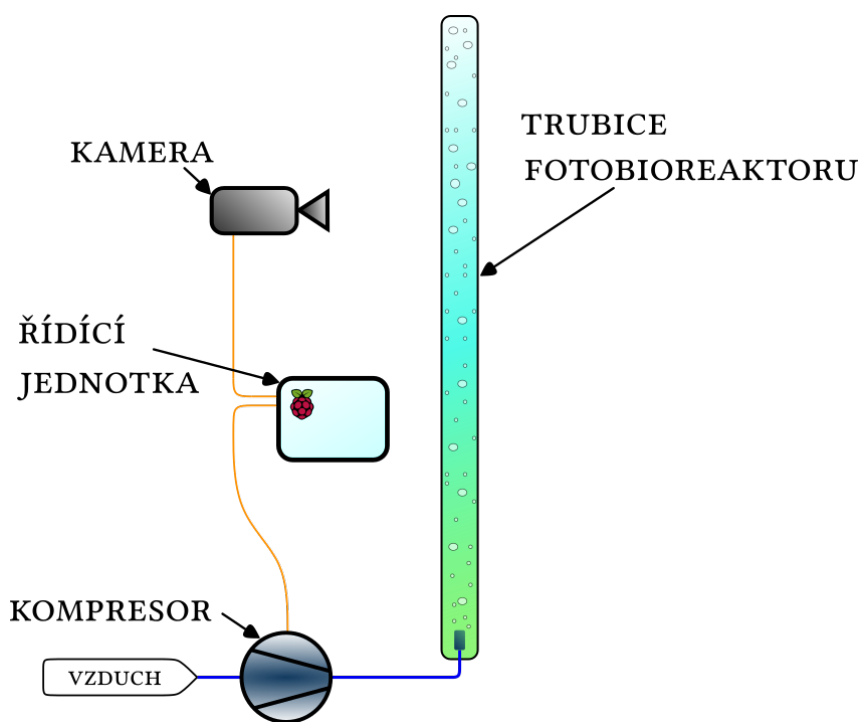
Výzkum a vývoj technologií ovšem potvrzují příslib, že mikrořasy jsou perspektivním produktem. Řasy na rozdíl od suchozemských rostlin mají vysokou biologickou rozmanitost s lehce ovlivnitelnými metabolickými procesy. K jejich pěstování není potřeba zabírat úrodné půdy a nekonkurují tak stávajícím dodávkám potravin a krmiv. Jejich rychlý růst a vysoká fotosyntetická účinnost potenciálně umožňuje vyšší plošné výnosy uchované energie v porovnání s pěstováním suchozemských rostlin. Díky těmto výhodám zůstávají mikrořasy perspektivní surovinou v oblasti energetiky, potravinářství a udržitelnosti. [14]

# 3

## Koncept práce

Cílem praktické části této práce bylo vytvořit zařízení, které by na základě obrazové analýzy dokázalo detekovat bubliny a jejich parametry. Tyto informace ukládat a řídit na jejich základě průtok vzduchu. Prvotní zjednodušený koncept je zobrazen na obrázku 3.1.

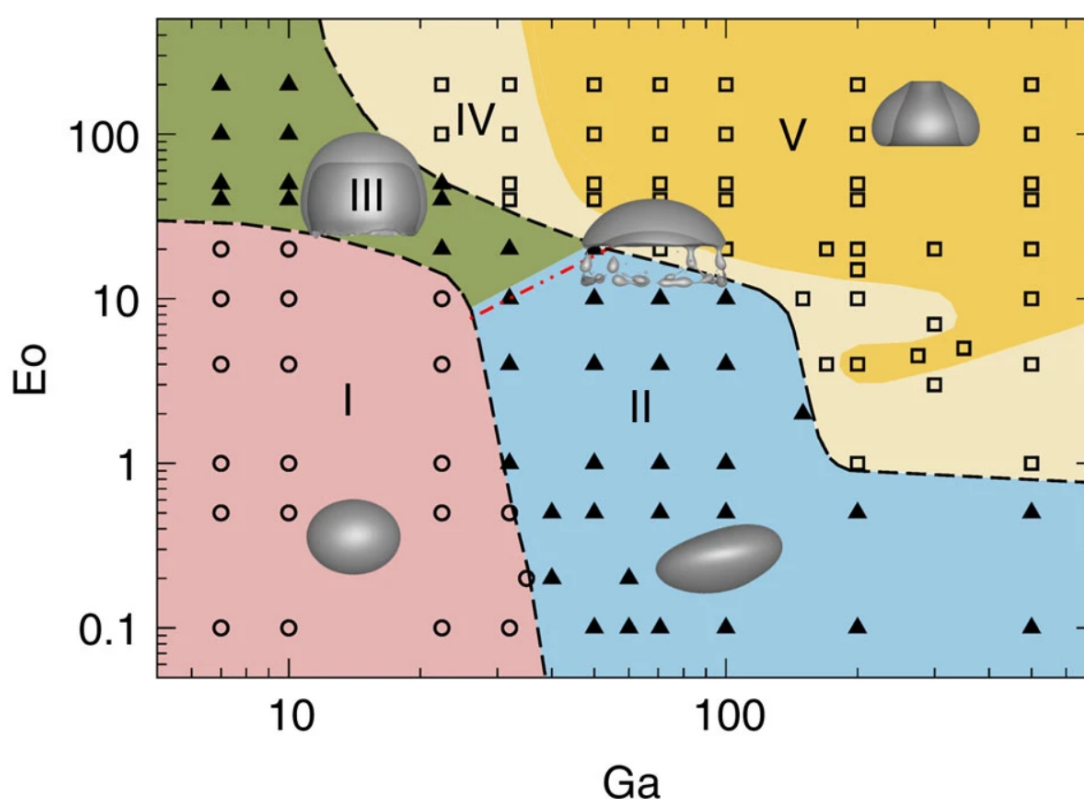
Prvotní myšlenkou bylo sestavení zařízení, jež by vyhodnocovalo snímky trubice fotobioreaktoru. Z těchto fotografií by byla získávána data o množství a velikosti bublin. Na základě těchto dat by byl regulovaný vzduchovací kompresor, či škrtící ventil. V případě dostatečného množství informací o poloze a tvaru bublin by mohly být bubliny replikovány ve 3D prostoru. Z tohoto důvodu byly uvažovány dvě kamery, svírající úhel 90°, s jejichž pomocí by mohlo být tohoto cíle dosaženo.



Obrázek 3.1: Zjednodušené schéma

### 3.1 Fyzikální vlastnosti bublin

Pohyb plyných bublin v kapalině je studován již několik století. Už v 15. století se tímto zabýval Leonardo da Vinci. Od té doby se lidé snaží přijít s modely tohoto jevu, neboť dynamika bublin hraje velkou roli v difúzních pochodech a při přenosech tepla. Predikce chování bublin je tématem mnoha studií, neboť množství parametrů, nelinearita a plná 3D povaha problému ho činí velmi složitým. Dle práce kolektivu autorů: M. K. Tripathi, K. C. Sahu a R. Govindarajan uveřejněnou pod názvem "Dynamics of an initially spherical bubble rising in quiescent liquid"[21] lze tento problém popsat čtyřmi bezrozměrnými parametry: Galileovým číslem  $Ga$ , Eötvösovým číslem  $Eo$ , poměrem hustoty  $\rho_r$  a poměrem viskozity  $\mu_r$ . Tato práce také obsahuje přehledný obrázek 3.2 popisující tvary bublin v závislosti na Eötvösově a Galileově čísle, kdy s nižšími čísly jsou bubliny sférické a se zvyšujícími hodnotami přecházejí ve tvary elipsoidní a kulové výseče až po zvonovité tvary.



Obrázek 3.2: Tvary bublin v závislosti na  $Eo$  a  $Ga$  čísle [21]

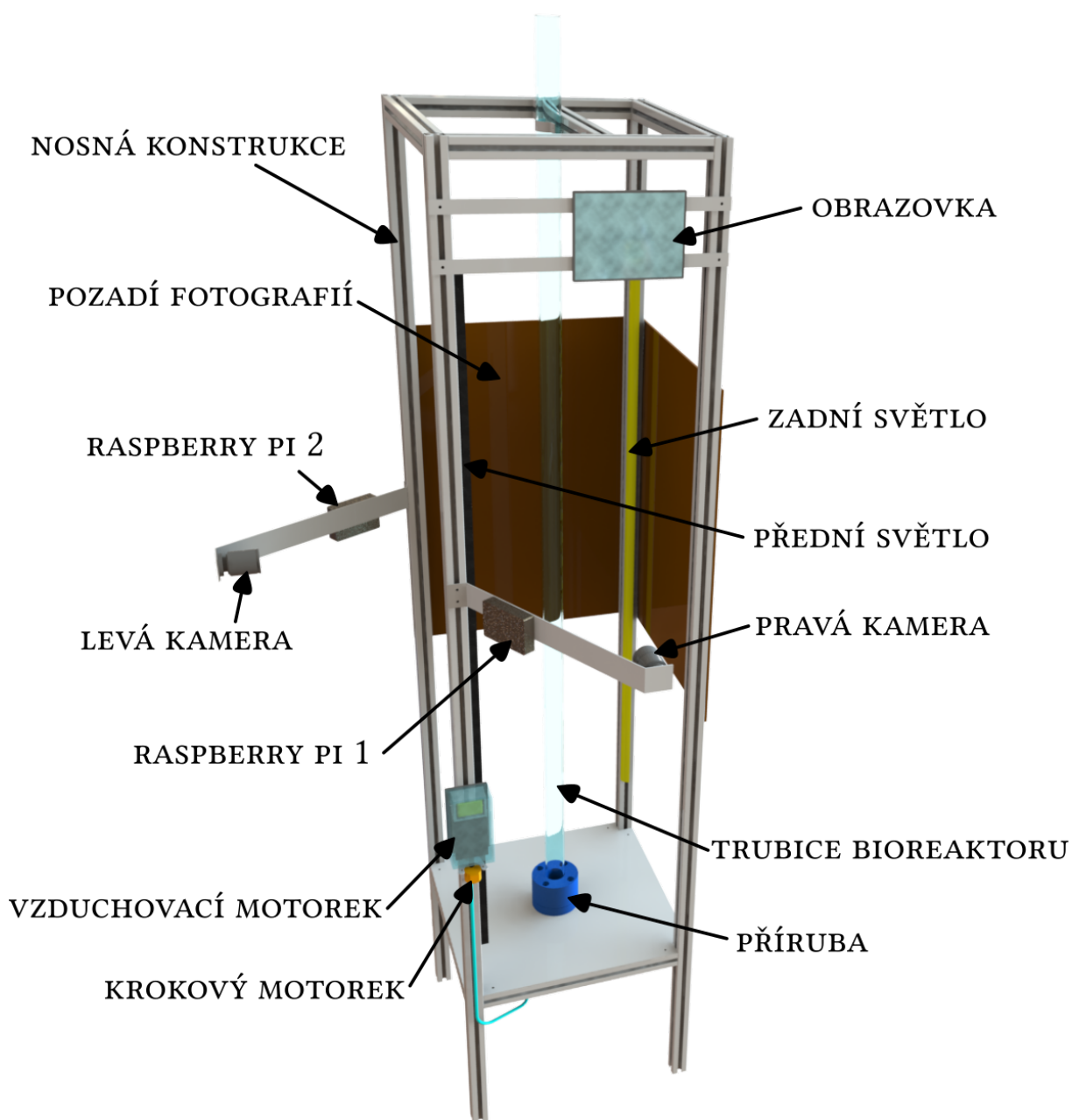
Bubliny při svém pohybu svůj tvar mění v závislosti na změně hydrostatického tlaku, pohybu okolní kapaliny, třecích silách, jejich rychlosti pohybu a mnoha dalších parametrech. Tyto změny tvaru jsou nejmenší u malých bublin, u kterých je povrchové napětí poměrově větší oproti dalším silám, což vnucuje bublinkám sférický tvar. Čím je bublina větší, tím rychleji stoupá a i díky tomu pozbývá sférických tvarů.

V této práci jsou předpokládány menší bubliny, neboť ty jsou z hlediska získání co největšího povrchu při daném objemu nejvýhodnější. Takovéto bubliny umožňují řasám získávat uhlík na větší ploše a zároveň po delší dobu, neboť bubliny stoupají pomaleji.

## 4 | Konstrukce zařízení

Návrh vycházel z již existujícího zařízení v laboratořích Ústavu procesního inženýrství. Jde o trubici o vnitřním průměru 32 mm se vzduchovacím elementem ve spodní části trubice. Tento prvek je připevněný k odjímatelné přírubě pro snadnou výměnu koncového zavzdušňovacího prvku. Nosná konstrukce je tvořena z hliníkových profilů  $30 \times 30$  mm, které byly zvoleny díky jejich jednoduché montáži a modularitě. Spodní plech dodává konstrukci tuhost a zároveň slouží jako podpěra trubici, která je ke konstrukci upevněna v horní části pomocí objímky. Dvě dřevovláknité desky naproti kamerám zajišťují konzistentní pozadí pro snímky a rovněž zvyšují tuhost sestavy.

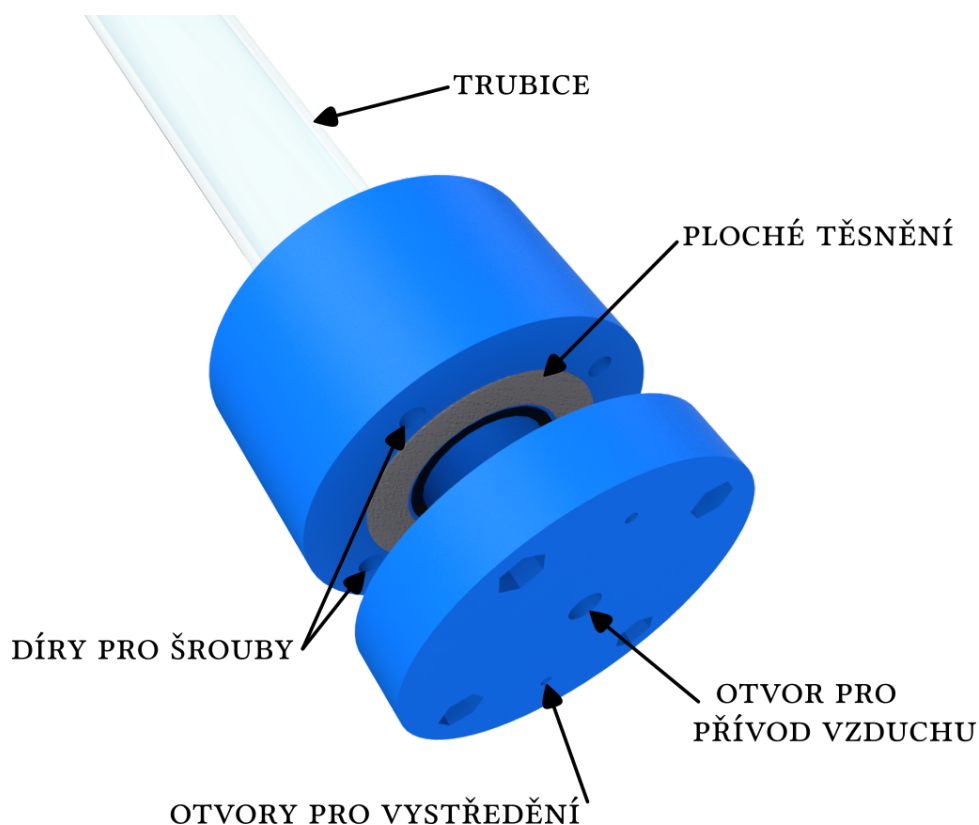
Pro návrh konstrukčního řešení zařízení byl použit program SolidWorks, ve kterém byl vytvořen 3D model zařízení viz obrázek 4.1. Podle modelu byl nejdříve objednán materiál a následně zařízení sestaveno.



Obrázek 4.1: Zjednodušený model zařízení

Detailněji byla zpracována spodní příruba, která byla následně vytisknuta na 3D tiskárně. Příruba je spojována čtyřmi šrouby M6 do zapuštěných matic pro co nejjednodušší rozebírání a těsněna plochým těsněním, které bylo preferováno před o-kroužkem pro snadnější aplikaci a složité odhadování smršťování se materiálu při 3D tisku. Ve spodní části příruby je otvor pro přívod vzduchu a dva menší otvory pro upevnění a vystředění trubice ve stojanu. Trubice je spojena s vrchní částí příruby nerozebíratelně. Obrázek 4.2 zobrazuje vymodelovanou přírubu.



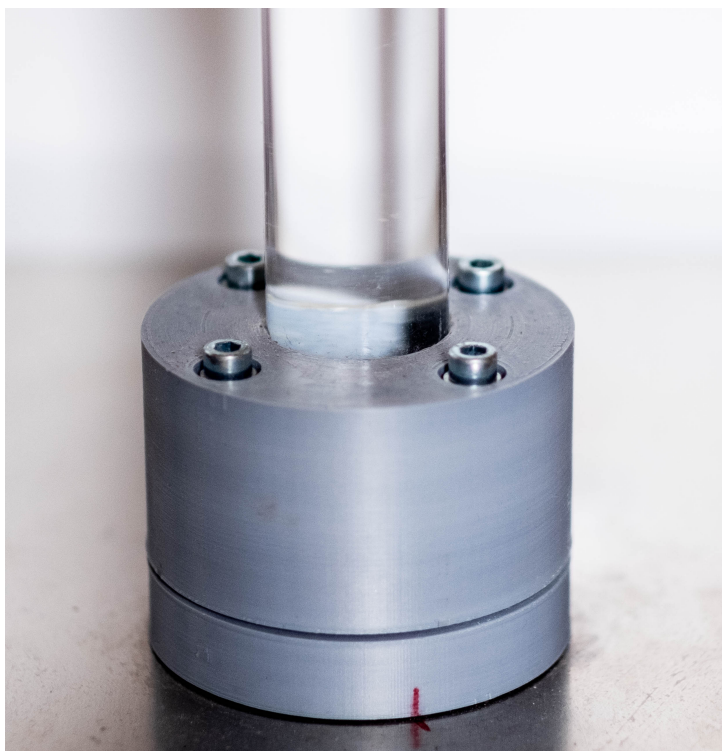


Obrázek 4.2: Model příruby

Elektronická a vzduchovací část zařízení modelována nebyla. Rozpis nakoupeného materiálu a zařízení je uveden v příloze A.

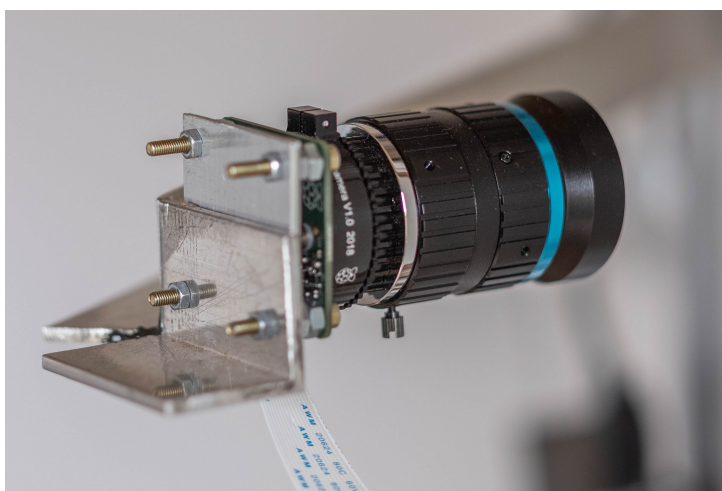
## 4.1 Sestavování zařízení

Při 3D tisku se materiál příruby smrskl více než bylo předpokládáno, a proto se hlavní otvor v horní části příruby musel vysoustružit na požadovanou velikost. Vůle daná pro otvory pro šrouby byla dostatečná. Ke spojení trubice a příruby se osvědčilo lepidlo na bázi tetrahydrofuranu, které zaručilo dostatečnou těsnost. Tímto lepidlem bylo přichyceno i ploché těsnění k jedné části příruby, pro snadnější manipulaci. Fotografie detailu příruby je zobrazena na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Příruba

Nosná konstrukce byla sestavena s mírnými úpravami oproti prvotnímu modelu. Například hliníková pásovina pro upevnění kamery se ukázala jako nedostatečně tuhá a byla nahrazena L profilem  $30 \times 30 \times 3$  mm. Aby bylo možné kameru přichytit, byl z původně plánované pásovin vyroběn díl, na němž je kamera uchycena a až ten je uchycen k ramenu z L profilu. Uchycení kamery je zobrazeno na obrázku 4.4.

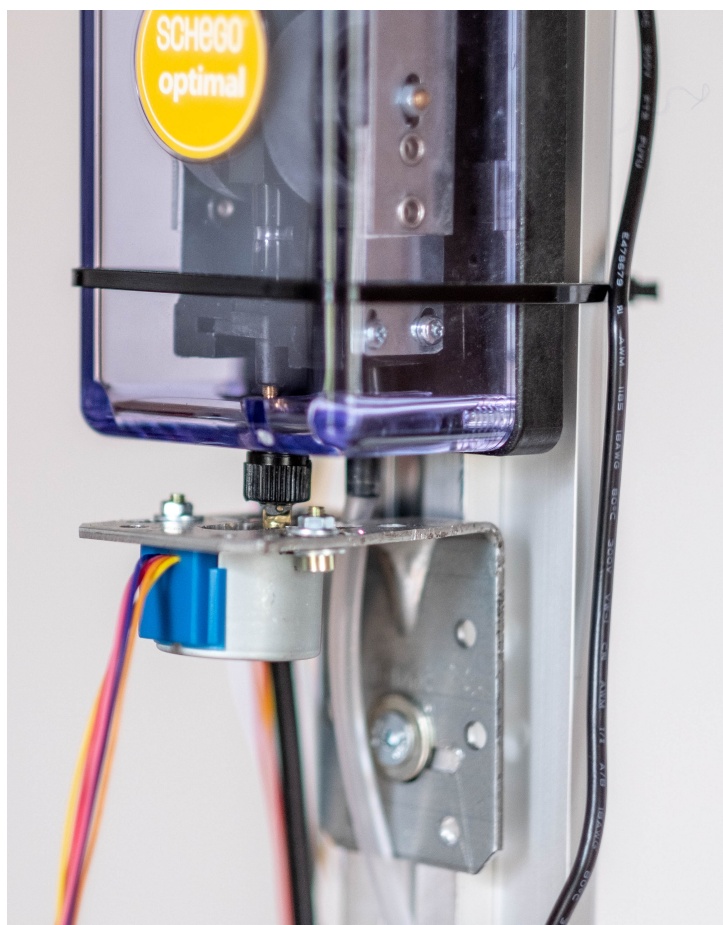


Obrázek 4.4: Uchycení kamery

Následně byla vyrobena spodní hliníková deska, vyříznutím rohů a vyvrtáním díry pro přívod vzduchu a dalších dvou, do kterých byly zalepeny centrovací čepy pro spodní část příruby.

K vytváření bublin byla zvolena akvaristická zařízení, neboť ta jsou určena k vytváření drobných a konzistentních bublin. Do sestavy byl zvolen regulovatelný vzduchovací motorek o výkonu až  $250 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ , který zajistí přetlačení vodního sloupce a dostatečné množství bublin, dále zpětný ventil, aby motorek mohl být umístěn pod úrovní hladiny. Posledním článkem sestavy je vzduchovací kámen, který zajistí rovnoměrné rozptýlení bublin o malé velikosti.

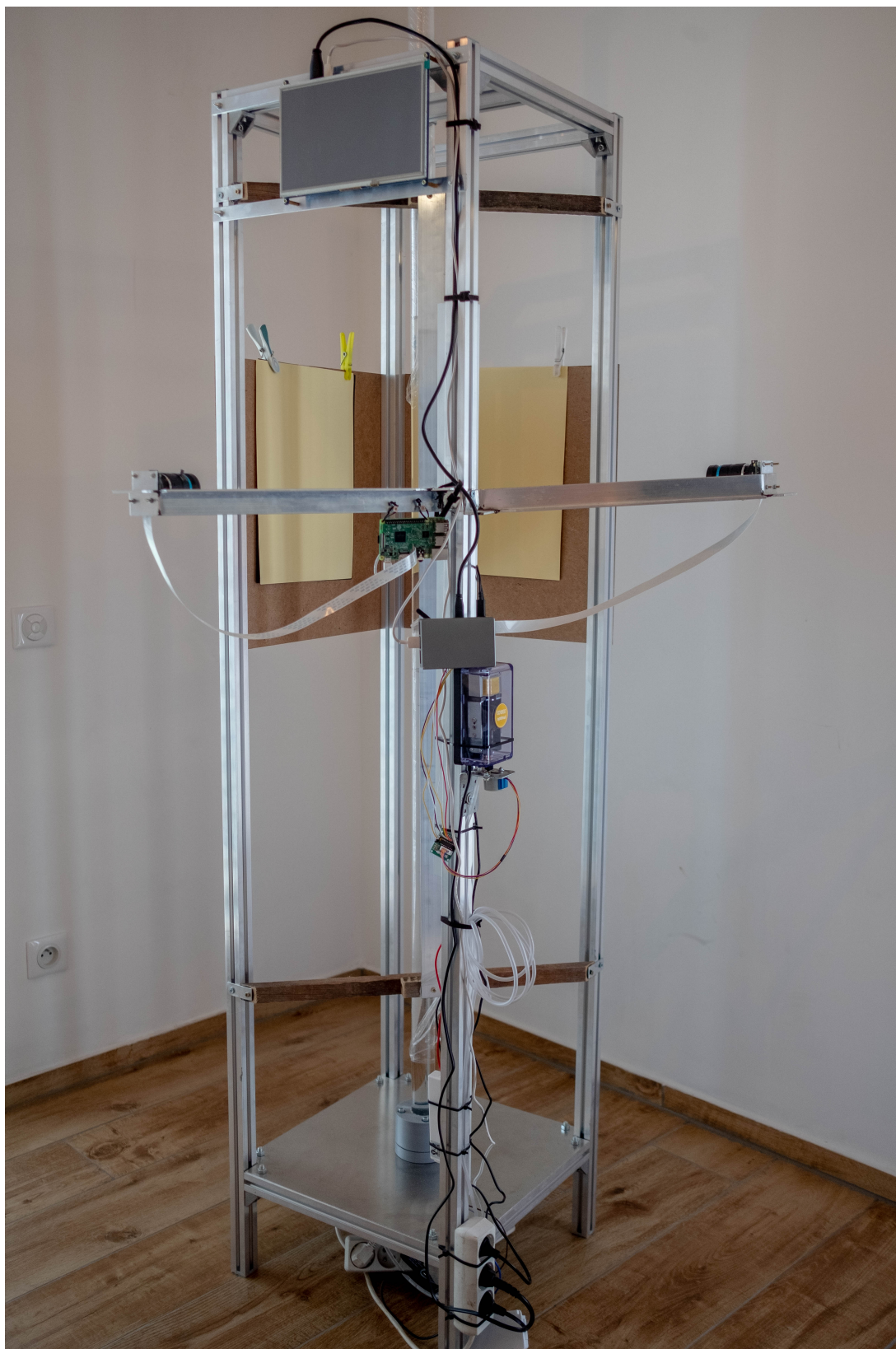
Vzduchování, Raspberry Pi i osvětlení bylo upevněno k nosné konstrukci. Osa krokového motorku byla pevně spojena s regulací kompresoru. Samotný krokový motorek, byl nejdříve upevněn za pomoci dřevěné konstrukce, ta však nebyla dostatečně tuhá a sesycháním dřeva se výrazně vychýlila souosost, což znemožnilo funkčnost. Dřevo bylo poté vyměněno za upravený kovový úhelník. Na obrázku 4.5 je zobrazeno uchycení regulačního motorku a napojení na vzduchovací kompresor.



Obrázek 4.5: Uchycení regulačního motorku

V průběhu celé práce pak zařízení procházelo mírnými úpravami. Výsledně sestavené zařízení je zobrazeno na obrázku 4.6.





Obrázek 4.6: Sestavené zařízení

# 5 | **Obrazová analýza**

Obrazová analýza představuje nástroj, pomocí něhož je možné obraz za pomoci algoritmů zpracovávat a získávat z něj cenné informace. Její využití se velmi rychle rozšiřuje do různých odvětví od zemědělství, kde slouží například k detekci zralého ovoce či škůdců, [22] po analýzu rakovinových nádorů v medicíně [23].

K vytvoření softwaru byl zvolen programovací jazyk Python z důvodu snadné syntaxe, vhodných knihoven, velké rozšířenosti a tedy i dokumentace.

## **5.1 Jak detekovat bubliny**

Je mnoho možností jak z obrazu detekovat bublinu a její parametry, ovšem na základě dostupných zdrojů se nejčastěji opakovala metoda neuronových sítí. Například je uvedena velmi zajímavá práce „Bubble patterns recognition using neural networks: Application to the analysis of a two-phase bubbly jet“ od kolektivu autorů: I. Poletaev, M. P. Tokarev K. a S. Pervunin. [24] Tento způsob je poměrně komplikovaný, a proto byla hledána další řešení.

Druhá častá metoda je založena na detekci hran. Například je použita v této práci „The Bubble Box: Towards an Automated Visual Sensor for 3D Analysis and Characterization of Marine Gas Release Sites“ od autorů: A. Jordt, C. Zelenka, J. S. Deimling, R. Koch a K. Köser [25]. Tato metoda je jednodušší a nenese takové riziko neúspěchu, neboť vytvoření kvalitního modelu pro učení neuronové sítě je velmi složité.

Z důvodů výše uvedených byla pro tuto práci zvolena metoda na základě detekce hran.

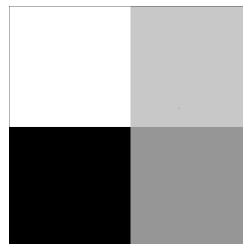
## **5.2 Obraz**

Aby mohl být obraz zpracován počítačem, musí mu být předložen ve formátu, který dokáže zpracovat. Takovéto fotografie se získávají za pomoci digitálních fotoaparátů, které obsahují pole elektronických fotodetektorů k produkci snímků zaostřených objektivem. Zachycené snímky jsou digitalizovány a uloženy jako počítačový soubor. Digitální fotografie se ukládají v takzvané rastrové grafice. Obraz je v rastrové grafice reprezentován jako souhrn bodů s určitou hodnotou. Tyto obrazové body nazýváme pixely (picture elements). Pixel nemá předepsaný tvar ani velikost. Nejčastěji se ovšem používá v mřížkovém uspořádání. Hodnota pixelu udává jeho barvu.

Pokud tedy reálný obraz rozdělíme mřížkou, bude každý její segment obsahovat detailní kresbu. Pixel je ovšem reprezentován pouze jednou barvou, a proto dochází ke zjednodušení obrazu. Tedy čím více pixelů, tím přesnější zachycení obrazu. Hodnota rozlišení nám udává, kolik pixelů obraz obsahuje. Většinou se udává počet pixelů na šířku a výšku, ne jejich součin.

Obraz je tedy v počítači uchováván jako matice, kde každý prvek matice reprezentuje jeden pixel. Takže pro vytvoření jednoduchého obrázku, viz 5.1 vpravo, stačí vytvořit matici zobrazenou na obrázku 5.1 vlevo, která ho plně popisuje.

$$\begin{pmatrix} 255 & 200 \\ 0 & 150 \end{pmatrix}$$

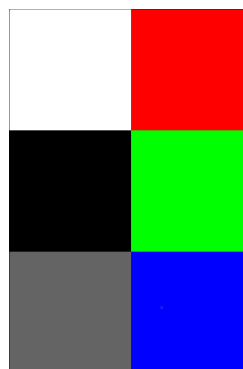


Obrázek 5.1: Ukázka zapsání obrázku v matici

Barevná hloubka je termín, který popisuje počet bitů použitých k popsání barvy jednoho pixelu. V tomto případě byla použita 8 bitová reprezentace.  $2^8 = 256$  tedy každému pixelu lze přiřadit hodnotu od 0 do 255. Lze tedy získat obraz o 256 možných barvách/odstínech. To, jakou barvu jednotlivé číslo reprezentuje, jde samozřejmě zvolit, zde byly zvoleny odstíny černé. Hodnota 0 dá pixelu černou barvu, zatímco bílou barvu definuje číslo 255. Takovýto obraz je popisován jako jednokanálový, neboť uchovává pouze jednu hodnotu.

Pro vytvoření barevného obrazu se nejčastěji používá RGB (červená, zelená, modrá) model, kde jsou uchovávány hodnoty každého z kanálu a výsledná barva vychází z kombinace jejich hodnot. Obrázek 5.2 reprezentuje jednoduchý RGB obraz a jeho matici.

$$\begin{pmatrix} (255 \ 255 \ 255) & (255 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 0 \ 0) & (0 \ 255 \ 0) \\ (100 \ 100 \ 100) & (0 \ 0 \ 255) \end{pmatrix}$$



Obrázek 5.2: Ukázka zapsání obrázku v matici

## 5.3 Python knihovny pro zpracování obrazu

Python je velmi populární programovací jazyk, a tak existuje mnoho různých knihoven pro zpracování obrazu. V této části jsou některé z nich popsány společně s jejich využitím v této práci.

### NumPy

NumPy jedna z nejvíce využívaných knihoven v Pythonu. Definuje typ pro n-rozměrné homogenní pole a téměř všechny knihovny, kde se objevují matice, jsou postavené na NumPy. Z tohoto důvodu je tato knihovna zásadní, neboť na jejích základech stojí většina ostatních. Jde ovšem využívat i sama o sobě k jednoduchým operacím jako například importu fotek, ořezávání, otáčení, k separaci kanálů a mnoho dalším.

### Matplotlib

Matplotlib je komplexní knihovna zaměřená především na vytváření vizualizací v Pythonu. Nejčastěji se využívá k vytváření grafů, či animací. V této práci byla zejména využívána pro vykreslování obrázků, ovšem nabízí i jiné užitečné funkce pro práci s fotografiemi.

### Scikit-image

Tato knihovna je určena přímo pro zpracování obrazu. Umožňuje různé druhy filtrování, převody formátů, morfologické operace i vizualizace. [26] S touto knihovnou bylo zkoušeno především prahování<sup>1</sup>, které vykazovalo dobré výsledky, zejména při použití funkcí lokálního prahování. Po jeho aplikování by bylo možné využít takzvané vyplňování z bílého místa na fotografii, kde by následně nevyplněné prostory obrázku představovaly bubliny, viz článek [27]. Od této metody nakonec bylo ustoupeno a Scikit-image knihovna nakonec v práci použita nebyla. Místo ní bylo využito balíčku OpenCV, jenž je o něco rozšířenější a lépe optimalizovaný pro vyhodnocování v reálném čase.

### OpenCV

Open CV (Open Source Computer Vision Library) je open-source platforma, jež byla zprvu vyvíjena společností Intel. Její primární rozhraní je v C++, což jí přidává na rychlosti. OpenCV-Python pak kombinuje snadnou syntax Pythonu a výpočetně rychlejší C++. [28] Tato knihovna má velmi dobře zpracované manuály a existuje mnoho příkladů reálného použití, zejména proto jí byla dána přednost před Scikit-image.

## 5.4 Testované možnosti a metody pro nalezení bublin

S digitální fotografií lze pracovat téměř neomezenými způsoby. Neexistuje žádný univerzální manuál jak docílit požadovaného efektu a téhož výsledku lze docílit různými metodami, ač se

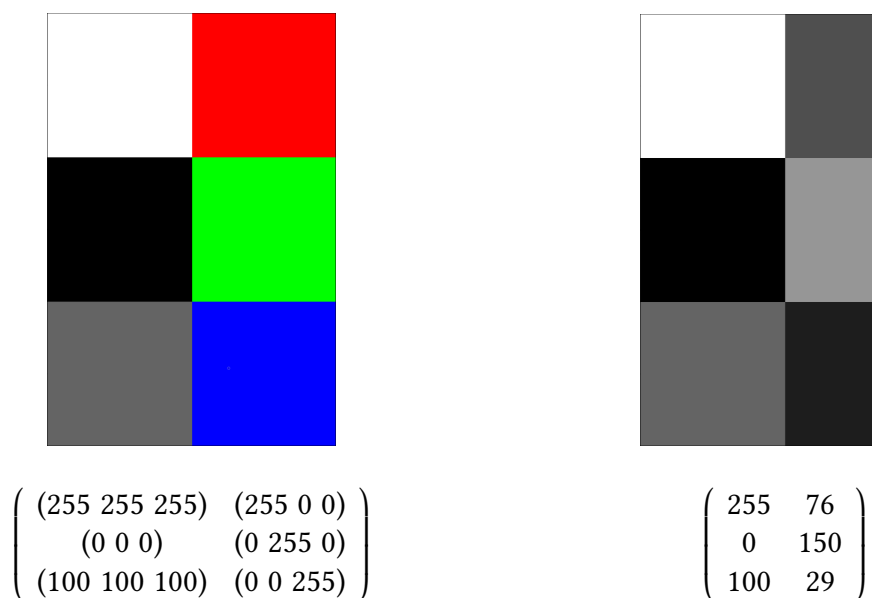
---

<sup>1</sup> ponechání pixelů nad, či pod určitou hodnotou. Více viz kapitola 5.4.3

jedná o zprůměrování hodnot jednotlivých vrstev, použití pouze jedné z nich, hledání rozličných filtrů a optimalizování pořadí jejich použití, nebo vymýšlení vlastních nových metod. Z těchto důvodů bylo testováno mnoho různých způsobů jak nalézt bubliny na obrázcích. Některé metody, především ty používané v konečné verzi, jsou v této části popsány.

### 5.4.1 Zjednodušení obrazu

Jak již bylo zmíněno, obraz se může skládat z více kanálů. Aby se obraz snadněji a efektivněji zpracovával, je snadnější si ho převést pouze do jednoho kanálu. Při převodu obrazu z RGB do odstínů šedé přiřadíme každému pixelu pouze jednu hodnotu - odstín. (Většinou se pracuje s odstíny šedé, ovšem k zobrazení se dají použít i jiné barvy.) Balíček OpenCV většinou pracuje s 8-bitovým formátem, proto se fotky převádí z RGB do 256 odstínů šedi. Na obrázku 5.3 vlevo je zobrazen obrázek před převodem i s jeho popisnou maticí, vpravo je pak zobrazen ten samý obrázek převedený do odstínů šedé.



Obrázek 5.3: Ukázka převodu z RGB do odstínů šedi

Transformace je provedena dle vztahu 5.1.

$$Y = 0.299 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B \quad (5.1)$$

Kde  $Y$  značí výslednou hodnotu pixelu a  $R$ ,  $G$ ,  $B$  značí červené, zelené a modré spektrum obrázku, v daném pořadí. [29]

### 5.4.2 Histogram

Histogram obrazu je grafická reprezentace počtu pixelů se stejnou hodnotou pixelů. Histogramy jsou velmi užitečné pro analýzu obrazu. Pomáhají nám určit jasové kvality snímku. Jsou velmi

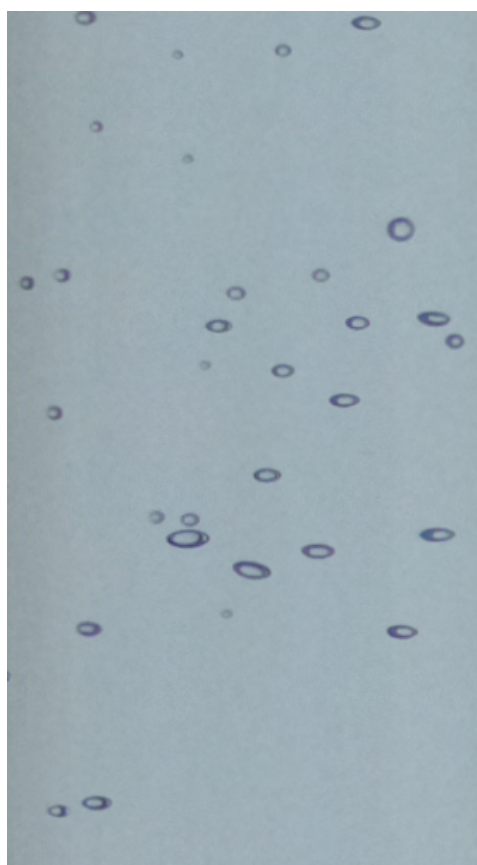


nápomocné při určení vhodné hodnoty pro prahování. [30]

### 5.4.3 Prahování

Prahování je metoda, kdy obrázek převedeme z odstínů šedi na černo-bílý a to tím, že porovnáme hodnotu každého pixelu s prahovou hodnotou, a pokud bude mít pixel větší hodnotu než práh, přiřadí se mu hodnota 255, tedy zbledá. Pokud má ovšem hodnotu nižší, zčerná. Tímto nám vznikne čistě bílo-černý obrázek s ostrými liniemi. [30] Pokud bychom toto aplikovali na obraz s bublinami, tak v ideálním případě bychom mohli dostat černý obrázek s bílými místy, které by znázorňovaly vzduchové bubliny. Pak by bylo například možné spočítat množství bílých pixelů, a tím zhruba odvodit množství přítomného vzduchu, nebo bílé skvrny hlouběji analyzovat.

Toto řešení není příliš vhodné, neboť bubliny nemají ve všech místech světlejší, či tmavší odstín než okolí. Pokud by se ovšem podařilo mít alespoň okraje bublin vždy ve výraznějším odstínu než okolí, výsledkem prahování by pak mohly být černé okraje bublin na bílém pozadí, viz obrázek 5.4.



(a) Před prahováním



(b) Po prahování

Obrázek 5.4: Prahování za pomoci knihovny Scikit-image

V tomto případě bylo použito lokální prahování, jež si prahové hodnoty nastavuje dle okolních pixelů.

Pro zaplnění vnitřku bublin po prahování může být použita funkce *floodFill* [31], která vyplní bílá místa na obrázku, jež nejsou celistvě ohraničená černou hranou bubliny viz obrázek 5.4b. *FloodFill* funguje tak, jakoby do jednoho místa obrázku byla nalita barva a ta se rozlila všude, dokud jí v tom nějaká bariéra nezabrání. Inverzí tohoto výsledného snímku lze získat celočerné bubliny na bílém pozadí.

Pokud ovšem není bublina zcela uzavřená, tato metoda na ní fungovat nebude. K propojení neuzavřených hran lze použít morfologickou operaci uzavírání. Tu by šlo použít i místo funkce *floodFill*, ale jelikož může značně znehodnotit výsledky, je lepší ji využít v co nejmenší míře.

#### 5.4.4 Morfologické operace

Morfologické operace jsou poměrně jednoduchým, ale velmi silným nástrojem pro analýzu obrazu. Fungují na jednoduchém principu, kdy se definuje malá matice číslem, nazývaná strukturní element, která se aplikuje na každý pixel v obrázku a pro každý určí novou hodnotu na základě jejích hodnot a hodnot okolích pixelů. Za pomoci různých čísel ve strukturním elementu můžeme dosahovat různých výsledků. Od rozostřování, filtrování, ztmavování, detekce hran atd. Na příkladu dilatace je tato operace vysvětlena podrobněji.

##### Dilatace

Dilatace slouží například k zaplnění malých děr či zálivů v objektech. Dosahuje toho tím, že rozšíří hranice objektu. Pro názornost je její funkce ukázána na jednoduchém booleovském obrázku 5.5 o velikosti  $5 \times 5$  pixelů reprezentovaného maticí, kde 1 reprezentuje barvu černou a 0 bílou.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Obrázek 5.5:  $5 \times 5$  matice reprezentující booleovský obrázek

Strukturním elementem nám bude matice o velikosti  $3 \times 3$ , viz obrázek 5.6.

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Obrázek 5.6: Strukturní element

Na obrázcích 5.7 jsou zobrazeny matice, které vznikly logickým součinem obrázku a strukturního elementu na zvýrazněné pozici. Za podmínky, že nějaký pixel po součinu ve zvýrazněné oblasti dosáhne hodnoty 1, je hodnota současného (centrálního) pixelu uložena do výsledné

matice. Na obrázku 5.7a žádný pixel po součinu obou matic nedosáhl hodnoty 1, zatímco na obrázku 5.7b se takový bod nachází, proto je aktuální centrální bod na výsledném obrázku 5.8 zobrazen s hodnotou 1.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

(a) První pozice                      (b) Druhá pozice

Obrázek 5.7: Různé pozice strukturního elementu

Po vyhodnocení celého obrázku vyjde tato matice, viz obrázek 5.8.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Obrázek 5.8: Výsledný obrázek po dilataci

Po dilataci se celý objekt zvětšil, většinou je dilatace následována její opačnou funkcí - erozí. Tato kombinace slouží k zaplňování děr a úzkých zálivů v objektech, ovšem eroze zamezí celkovému zvětšení objektu. Tato kombinace se označuje jako uzavírání. [32]

### 5.4.5 Detekce hrany

Pro detekování hran byl vybrán Cannyho hranový detektor [33], který byl představen už v roce 1986 a stále platí za jeden z nejvíce používaných. Je to několikastupňový algoritmus skládající se ze čtyř hlavních úkonů.

#### a) Redukce šumu

Šum může být různých typů. Zjednodušeně si ho lze představit jako náhodné pixely obrázku, které nekorespondují s ostatními v jeho okolí. Jelikož detekce hran se zakládá na rozdílech v hodnotách sousedících bodů, je chtěné šum redukovat, aby nebyl falešně detekován jako hrana.

Pro redukci šumu se nejčastěji využívá Gaussův filtr. Jedná se o morfologickou operaci, při které dochází ke zprůměrování pixelů. Ovšem nejde o prosté zprůměrování hodnot, kde by se centrálnímu pixelu přiřadila průměrná hodnota všech pixelů ve strukturním elementu. Tak by fungoval filtr, jehož strukturní matice by obsahovala samé jedničky. U Gaussova filtru nemají

všechny body stejnou váhu. Váha pixelu se přikládá v závislosti na vzdálenosti bodu od aktuálně centrálního bodu. Hodnoty strukturní matice jsou přiřazeny na základě Gaussovy funkce.

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.2)$$

Kde:

$e$	Eulerovo číslo	–
$a$	kladný parametr funkce značící hodnotu jejího vrcholu	–
$\sigma$	parametr funkce určující její šířku	–
$\mu$	parametr sloužící k posunu funkce	–

Dle zvolené  $\sigma$  filtr více, či méně zohledňuje okolní hodnoty. Často používaný strukturní element o velikosti  $5 \times 5$  je použit ve vztahu 5.3, který vyhodnocuje hodnotu pixelu.

$$K = 1/256 \begin{pmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

Nevýhodu redukce šumu je, že dochází k mírnému rozmazání obrazu, a hrany pak nemusí být tak výrazné. Avšak z důvodu malého strukturního elementu Sobelova detektoru ( $3 \times 3$ ), je důležité se šumu zbavit, neboť snadno zamění šum za hranu.

## b) Hledání směru gradientu

Pro nalezení hran je rovněž několik metodik, například Sobelův, Scharrův, Prewittův či Robinsonův operátor, ovšem Sobelův je jeden z těch nejznámějších a rovněž je obsažen v OpenCV. Sobelův detektor je morfologická operace, jež přiřadí pixelům hodnotu na základě velikosti rozdílu odstínu vlastního a okolních bodů.

Detekce probíhá ve dvou směrech  $x$  a  $y$  dle následujících vztahů:

$$G_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad G_y = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Výslednou velikost gradientu získáme za pomoci vztahu 5.5

$$G_v = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (5.5)$$

Jelikož byly hrany detekovány ve dvou směrech  $x$  a  $y$ , je možné určit jejich výsledný směr. Ten je důležitý v dalším kroku, aby bylo možné zjistit, jakým směrem hrana postupuje. Pro jeho hodnotu slouží následující vztah:

$$\arctg = \frac{G_y}{G_x} \quad (5.6)$$

Kde:

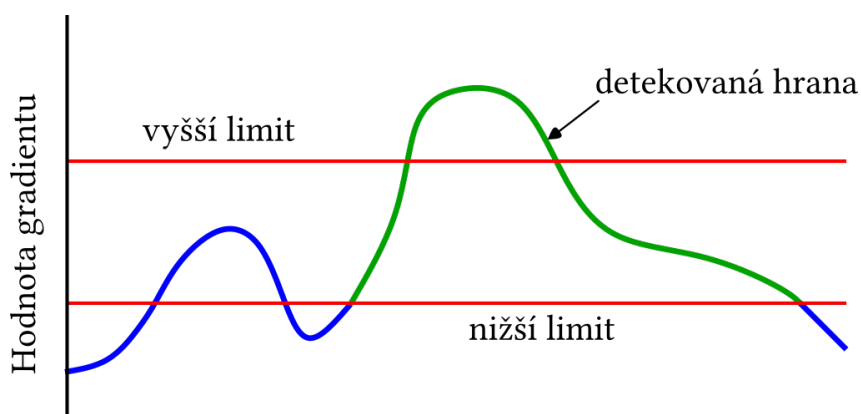
$G_x$	gradient ve směru osy x	–
$G_y$	gradient ve směru osy y	–
$G_v$	výsledný gradient	–

### c) Zeštíhlování hrany

V tomto kroku je cílem z výsledku Sobelova filtru získat hrany jeden pixel široké, neboť s hranami o různých tloušťkách a intenzitách se špatně pracuje. Hlavní chtěnou informací je především to, kde přesně se hrana nachází. Canny toto řeší za pomoci nacházení lokálních maximálních hodnot gradientu. Tedy tam, kde je největší změna, bude střed hrany. Zde ovšem velikost změny algoritmus vyhodnocuje pouze ve směru kolmém na hranu. Tuto kolmost odhaduje právě z výsledku Sobelova filtru. [34]

### d) Hysterézní prahování

V posledním kroku Cannyho algoritmus vyhodnocuje, zda je hrana dostatečně výrazná na základě dvou limitů. Pokud je hodnota gradientu pixelu pod nižším limitem, je bod zavržen a na výstupu bude mít pixel nulovou hodnotu. Pokud je hodnota gradientu pixelu vyšší než spodní hranice, bude mu v konci připsána hodnota jedna, pouze pokud sousedí s nějakým pixelem s hodnotou nad druhou hranicí a to buď přímo, nebo přes další pixely v rozmezí obou limitů. Pokud je hodnota gradientu bodu vyšší než druhá hranice, jeho hodnotou na výstupu je vždy jednička. Tento postup je prezentován na obrázku 5.9, kde zelená barva reprezentuje výslednou hranu a modrá barva hranu zamítnutou. [34]



Obrázek 5.9: Ukázka funkce hysterézního prahování

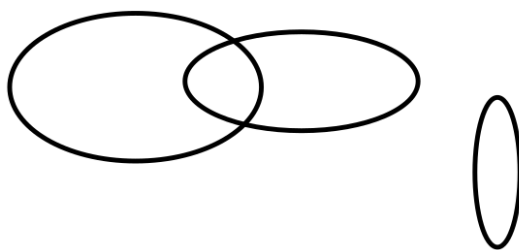
### 5.4.6 Rozpoznávání elips

Nejoptimálnějším matematickým popisem malých bublin je elipsoid. Ve 2D prostoru fotografie je jím elipsa. Aby bylo možné definovat elipsu popisující bublinu, je nutné znát body jimiž má procházet.

Po vyseparování bodů okrajů bublin jsou body, které se navzájem dotýkají, spojeny do takzvaných kontur za pomoci metody OpenCV *findContours* [35]. Kontury jsou tedy shluky bodů představující v ideálním případě okraj bubliny. Tyto body jsou proloženy elipsami s využitím metody OpenCV *fitEllipseDirect* [35], která z kontur vytváří elipsy na základě metody nejmenších čtverců.

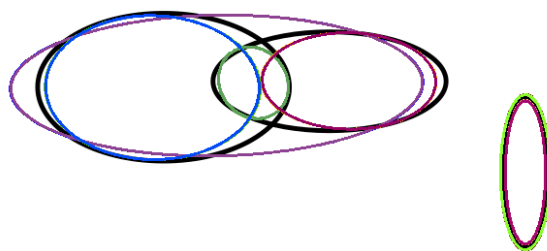
## 5.5 Aplikace na modelovém příkladu

Jelikož objednání a sestavení zařízení zabralo velké množství času, v první části projektu bylo vše testováno na vytvořených obrázcích či cizích fotkách bublin. Pro prvotní pochopení detekce hran a funkce nalezení elips byl vytvořen jednoduchý obrázek se třemi elipsami, viz obrázek 5.10, na kterém budou příklady popsány.



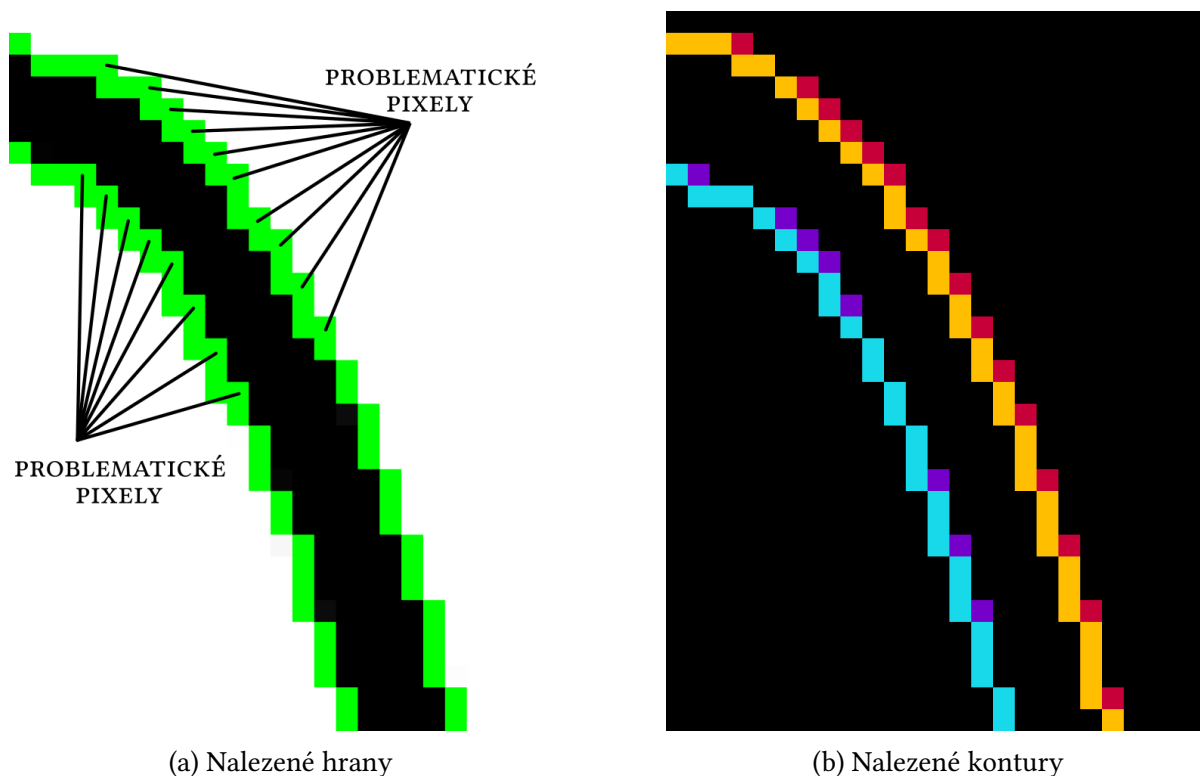
Obrázek 5.10: Testovací elipsy

Po importování, převedení na odstíny šedé o hloubce 8 bitů, aplikování Cannyho hranového detektoru, nalezení elips a jejich vykreslení za pomoci OpenCV, viz sekce 5.4, je výsledek zobrazen na obrázku 5.11.



Obrázek 5.11: Výsledek detekce elips bez jejich filtrování

Na obrázku 5.11 bylo nalezeno a vykresleno dvanáct kontur. Ideálním výsledkem by ovšem byly kontury tři. Důvody většího počtu nalezených kontur jsou níže popsány na příkladu osamocené elipsy, na níž byly nalezeny čtyři elipsy. Prvním důvodem je, že Cannyho hranový detektor nalezne vnitřní a vnější hranu elipsy. Druhým důvodem je, že hranový detektor v místech většího zakřivení nezeštíhlí nalezenou hranu maximálně, a vzniknou tak pixely reprezentující hranu, která nesousedí pouze se dvěma dalšími detekovanými, ale se třemi. Což algoritmus vyhledávající kontury detekuje jako další konturu. Na obrázku 5.12 je zobrazena vrchní pravá část osamocené elipsy po detekci hran a následném nalezení kontur.



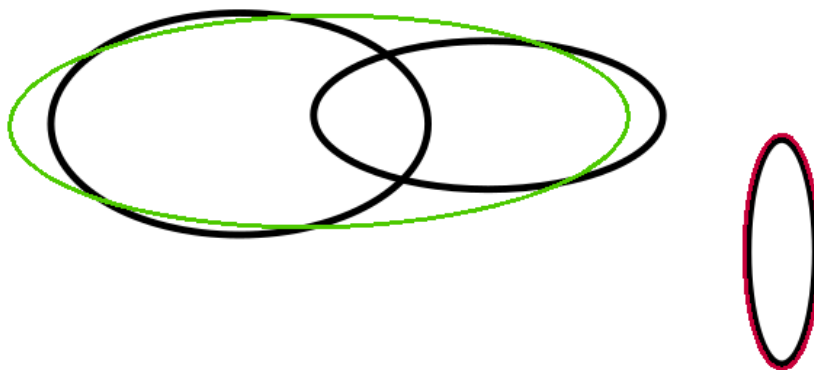
Obrázek 5.12: Detail osamocené elipsy

Na obrázku 5.12a jsou zelenou barvou zobrazeny nalezené kontury na původním obrázku. Na obrázku 5.12b jsou zobrazeny čtyři nalezené kontury zvýrazněné rozdílnými barvami. Je vidět, že například červená kontura má většinu bodů shodných se žlutou konturou, která ji překrývá. To, jak již bylo zmíněno, je způsobeno tím, že při detekci hran vznikají pixely, které sousedí se třemi dalšími, které jsou rovněž součástí hrany. Tyto pixely jsou znázorněny na obrázku 5.12a.

### 5.5.1 Vybrání vhodných elips

Jelikož je detekováno výše uvedenou metodou příliš mnoho elips, je nutné jejich počet eliminovat. Nejjednodušší vyeliminování je použít předvolbu pro hledání kontur *RETR\_EXTERNAL* [35], která ponechá jen kontury s nejvyšší hierarchií (tedy vyřadí všechny nalezené vnitřní elipsy). Toto funguje velmi dobře na osamocené elipsy, kde by na obrázku 5.12b zůstala pouze červená elipsa. Ovšem pokud by se překrývaly dvě bubliny (elipsy), byla by ponechána pouze

vnější kontura, která popisuje obě bubliny velmi nepřesně. Tato možnost je zobrazena na obrázku 5.13.



Obrázek 5.13: Ponechání pouze externích kontur

Tímto způsobem bylo dosaženo dvou elips, což rozhodně lépe popisuje skutečnost než předchozích dvanáct. Ovšem takto velká elipsa při přepočtu na rotační elipsoid dosahuje výrazně většího objemu než dvě černé přepočtené elipsy, které má reprezentovat (v tomto případě je její objem o ~60 % větší).

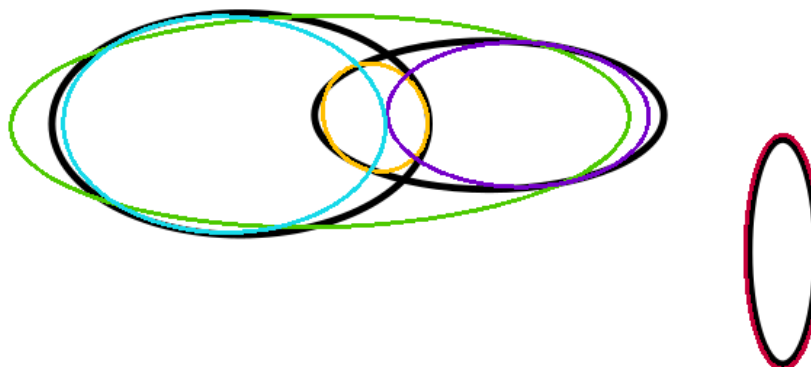
Pro ještě větší přiblížení skutečnému vykreslení nakreslených elips bylo zkoušeno vyloučení nechtěné elipsy pouze za pomoci hierarchie. To ovšem vedlo k velkému množství podmínek a ačkoliv výsledek na pokusném obrázku fungoval, byla nakonec zvolena robustnější varianta a to eliminace na základě podobných středů.

### Eliminace na základě podobných středů elips

Ta probíhá následovně: naleznou se všechny kontury za pomoci metody OpenCV *findContours* s parametrem *RETR\_TREE*<sup>2</sup> [35]. Všem konturám obsahujících více jak pět pixelů se přiřadí elipsa. Tedy kontura a její elipsa mají společný index dle pořadí kontury v hierarchii. Následně jsou nalezeny indexy, které jsou nejvýše v hierarchii kontur. Střed elips těchto vybraných indexů jsou pak postupně porovnávány se středy ostatních elips a pokud se středy nacházejí do určité vzdálenosti od sebe, index elipsy s nižší hierarchií kontury je odebrán z konečného seznamu chtěných indexů. Tímto lze eliminovat elipsy, které vznikají v důsledku vnitřní a vnější hrany a i ty, jež vznikají v důsledku větší šíře kontur. Výsledek této metody je zobrazen na obrázku 5.14, elipsy zde byly vylučovány, pokud jejich středy byly blíže než pět pixelů.

<sup>2</sup> metoda při níž se ponechají všechny nalezené elipsy

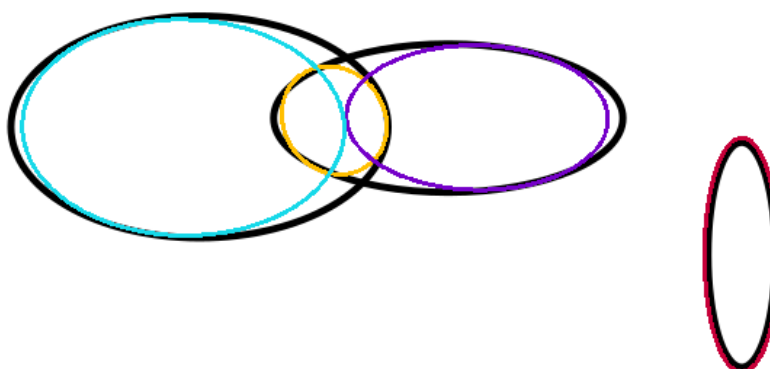




Obrázek 5.14: Eliminace na základě podobných středů elips

### Eliminace na základě vnitřních a vnějších elips

V předešlém vylučování bylo dosaženo pěti elips, což stále není optimální výstup. Metoda za použití pouze externích elips poskytne lepší výsledky. I pokud je vnější elipsa odstraněna, výsledek není ideální, ale popisuje bubliny s největší přesností. Na odstranění vnější elipsy byl připraven algoritmus, jenž nejdříve určí ohniska elipsy (například zelené na obrázku 5.14) v kartézských souřadnicích a následně kontroluje vzdálenost mezi těmito ohnisky a středy ostatních elips (například fialové na obrázku 5.14). Pokud je součet vzdáleností od jednoho ohniska ke středu a od středu do druhého ohniska menší než délka dvou hlavních poloos, pak je střed (fialové elipsy) umístěn uvnitř elipsy (zelené). Pokud elipsa obsahuje středy více jak jedné elipsy, je vnější elipsa vyřazena. Výsledek všech eliminací je zobrazen na obrázku 5.15. (Při přepočtu modré, žluté a fialové elipsy na rotační elipsoidy mají celkově o ~30 % menší objem než dvě černé elipsy, jenž mají reprezentovat.)



Obrázek 5.15: Výsledek po závěrečné eliminaci

Pro odstranění nejmenší vzniklé elipsy by mohlo posloužit vylučování na základě celkového počtu elips uvnitř elipsy jiné. Kde by se počet vydělil dvěma a výsledné dolů zaokrouhlené číslo by značilo, kolik nejmenších elips bude vyloučeno. Toto řešení není příliš robustní a navíc by ještě více snížilo celkový objem detekovaných elips, a proto nebylo zakomponováno.

## 6 | Vytváření snímků

K vytváření snímků byly pořízeny dva snímače Sony IMX477R a dva objektivy PT3611614M10MP. Pro prvotní testování kamery byl používán modul *raspistill* [36], který umožňuje jednoduše dělat náhledy. Následně již byla využívána knihovna *PiCamera* [37].

### 6.1 Jak provést dvě fotky najednou

Raspberry Pi disponuje MIPI CSI portem pro připojení kamery, ovšem pouze jedním. Aby bylo možné snímat bubliny ze dvou stran a získat tak přesnější data o jejich tvaru, byl objednáno modul Arducam Multi Camera Adapter Module V2.1. Ten ale neposkytoval chtěné řešení, neboť modul nepodporuje synchronizované focení, pouze umožňuje přepínat mezi kamerami.

Byla navržena tři možná řešení. První řešení je použití jedné kamery a sady tří zrcadel tvořící sestavu podobnou periskopu. Zde by mohl nastat problém s přesností umístění zrcadel a především odrazy světla. Druhý návrh spočívá v zapojení druhé kamery do dalšího Raspberry Pi, které by bylo propojeno s prvním. To by dávalo příkazy druhému k focení a následnému sdílení fotek. Zde by potíže mohla dělat synchronizace fotek. Třetím možným řešením by bylo objednání modulu Arducam Stereo Camera HAT kit - 8Mpx IMX219, jehož cena ovšem značně převyšuje cenu Raspberry Pi, a proto bylo toto řešení vyloučeno.

Jelikož druhá kamera již byla zakoupena a tím, že konstrukce a umístění světél by se muselo značně změnit při variantě se zrcadly, byla zvolena druhá možnost.

#### 6.1.1 Propojení dvou Raspberry Pi

Obě řídicí jednotky jsou propojeny ethernetovým kabelem, a je tedy možné využívat protokolu IPv4. Aby nebylo potřeba ovládat obě raspberry pi (a tedy kupovat dvě obrazovky, klávesnice a myši), je třeba, aby hlavní (výkonější) Raspberry Pi bylo schopno ovládat druhé zařízení a dávat mu příkazy.

Po spuštění programu na primárním Raspberry Pi je odeslán příkaz ke spuštění skriptu na druhém Raspberry Pi a to pomocí SSH. SSH (Secure Shell) umožňuje zabezpečenou komunikaci mezi dvěma zařízeními a přenosy souborů. Umožňuje také vytvoření veřejných a osobních klíčů, díky nimž není nutné při začátku komunikace zadávat přístupové údaje. [38]

Skript na druhém Raspberry Pi spustí server s využitím knihovny *socket*. Ta umožňuje přístup k BSD socket rozhraní. [39] Přes tento komunikační kanál pak spolu zařízení komunikují.

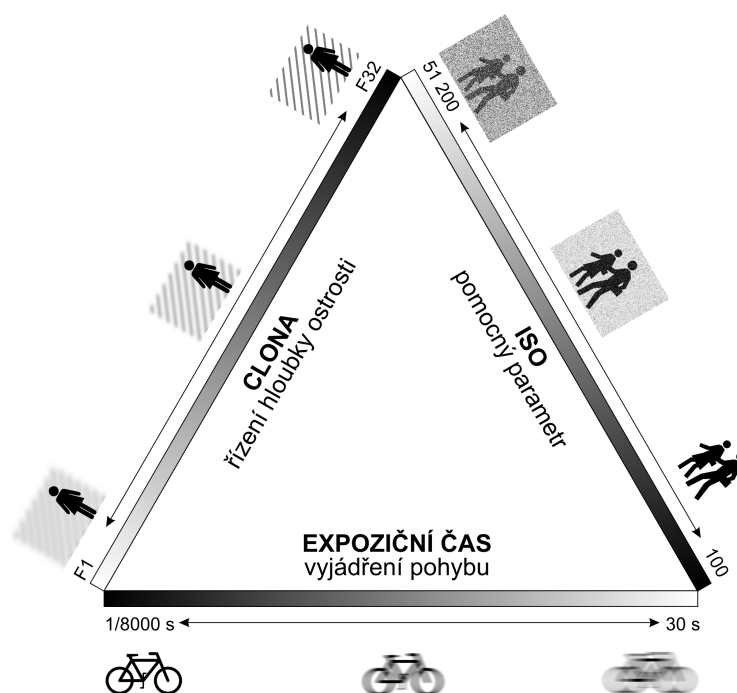
Server si udává svoji IPv4 adresu sám, ovšem do primárního Raspberry Pi je nutno ji při její změně zadávat. Tato komunikace se využívá k načasování focení, získávání statusů z druhého zařízení a posílání názvů souborů, jenž byly odeslány za pomoci SSH do prvního zařízení.

## 6.2 Jak získat vhodnou fotografii

Při focení bez jakékoliv úpravy nastavení je expozice fotografie moc dlouhá a na fotce buď bubliny úplně zaniknou, nebo jsou vidět jako světlé čáry. Pro ovládání kamery byly zkoušeny dvě možnosti - přes cmd za pomoci *raspistill* a nebo skrz Python za pomoci knihovny *PiCamera*. Zde bylo vycházeno z návodů pro knihovnu *PiCamera* [40]. Nastavení parametrů kamery je rovněž důležité pro konzistenci fotek, aby nastavení, například detekce hran, fungovalo na všech fotkách stejně.

### 6.2.1 Expozice

ISO, clona a doba expozice představují takzvaný expoziční trojúhelník. Změnou jednoho z nich jsou ovlivněny zbylé dva. Pro získání chtěné fotografie je třeba nalézt rovnováhu mezi těmito třemi parametry. Vztah mezi zmiňovanými parametry zobrazuje obrázek 6.1.



Obrázek 6.1: Expoziční trojúhelník [41]

### ISO

ISO vyjadřuje citlivost snímače na světlo. Obecně lze říci, že za dobrých světelných podmínek je snaha mít ISO co nejnižší, neboť při vyšších hodnotách vzniká na fotografiích šum. Vyšší ISO

nám ovšem umožňuje dělat fotografie s nižším expozičním časem, neboť snímač je citlivější, a proto mu stačí kratší čas.

### Expoziční čas

Expoziční čas, či doba uzávěrky, říká, po jakou dobu byly fotony dopadající na čidlo sčítány. V dobách, kdy se fotilo na film, představovala dobu, po kterou světlo dopadalo na film, než bylo světlo odstíněno mechanickou západkou. Čím déle světlo na snímač dopadá, tím obraz ztrácí na ostroti.

### Clona

Clona nám určuje takzvanou hloubka ostroti. Její hodnoty značené  $f$  udávají poměr mezi skutečnou ohniskovou vzdáleností a průměrem otvoru, přes které proudí objektivem světlo. Čím menší hodnota clonového čísla, tím větší je otvor propuštějící světlo objektivem a více světla projde dovnitř. Zároveň čím nižší hodnota, tím více je obraz zaostřen na menší úsek vzdálenosti. [41]

Na zakoupeném objektivu je nejnižší hodnota 1,4, při které byly ostré hrany jen některých bublin, ty více vzadu byly již rozmazané. Nejlepších výsledků bylo dosaženo s hodnotami mezi 2 až 2,8.

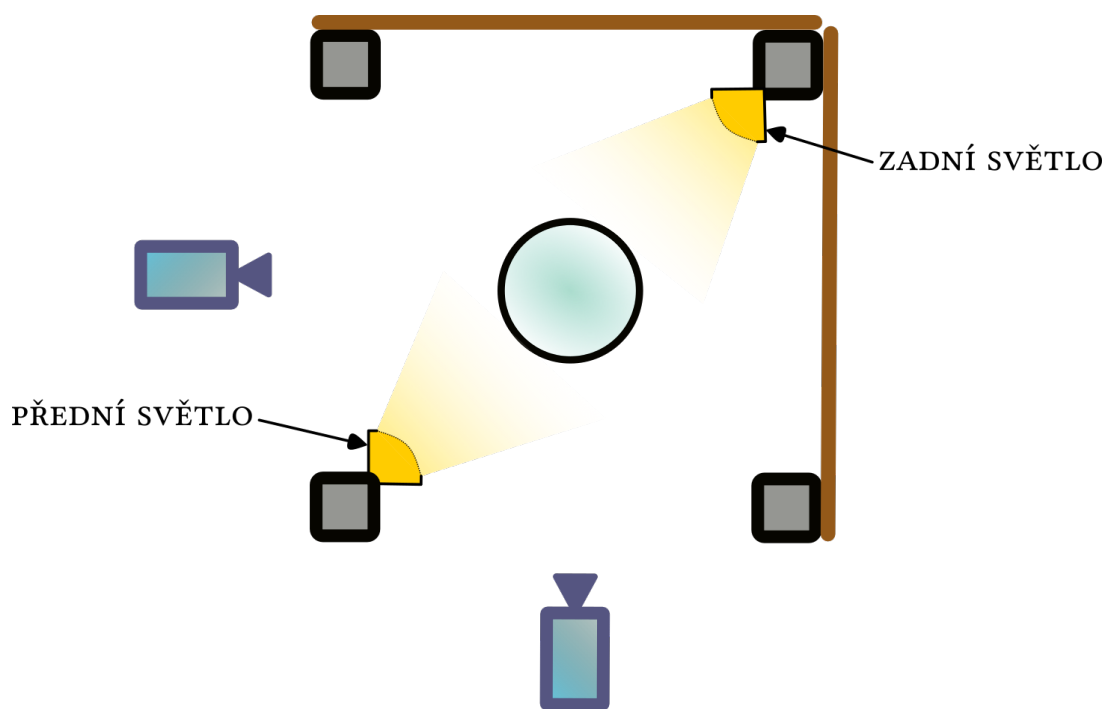
## 6.2.2 Výběr optimálních parametrů

Pro vybrání vhodného nastavení kamer byl napsán krátký program, jenž každých 5 vteřin udělal fotografii s jinými hodnotami ISO (100 až 900) a dobou uzávěrky (100 až 1200 ms) s intervalem 100 s pro obě nastavení. Clona se měnila manuálně vždy po dokončení předchozí série fotek. Zároveň se měnily světelné podmínky a pozadí fotek, což je popsáno v následující sekci.

Takto bylo postupně vytvořeno přes 1 000 fotografií, z nichž se postupně hledali nejlepší kandidáti.

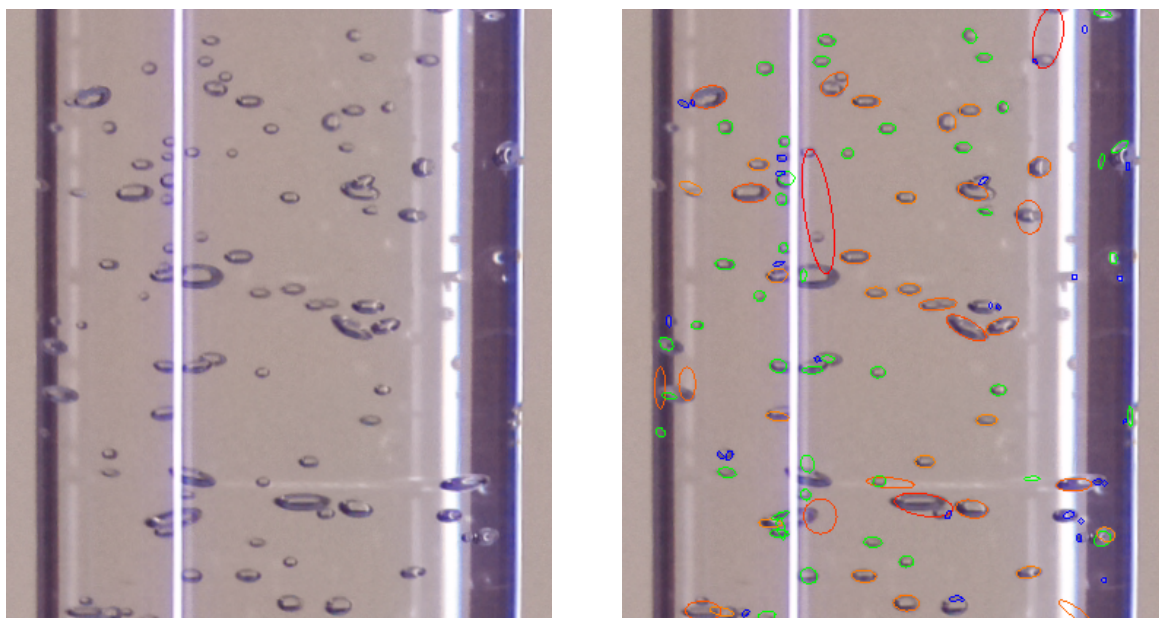
### Světelné podmínky

U focení je světlo ten nejdůležitější parametr. Při této konstrukci jsou dvě místa, kam dává největší smysl umístit pásové LED osvětlení, na obrázku 3D modelu 4.1 jsou definovány jako zadní a přední světlo. Obrázek 6.2 pak zobrazuje schematický pohled shora.



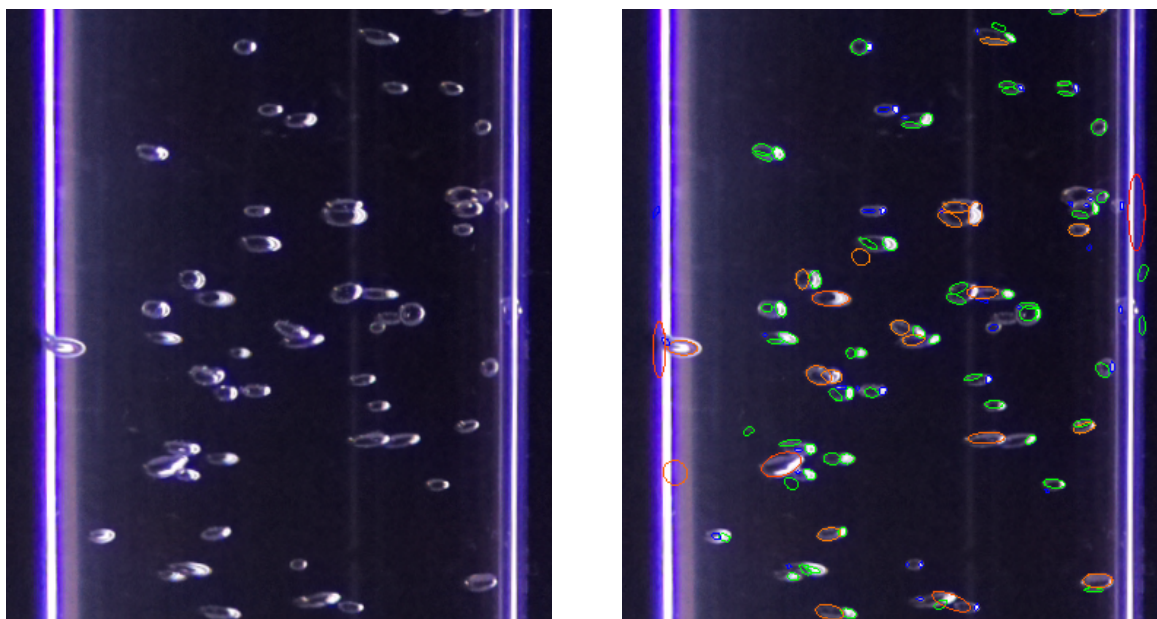
Obrázek 6.2: Schematický pohled shora na umístění světel

Prvně bylo světlo umístěno vpředu a vznikaly fotky s krásně ostrými hranami bublin, jež se snadno rozpoznávaly. Problémem byly odlesky, jež trubice odrážela do kamery. Kvůli nim bylo rozpoznávání v mnoha místech nemožné a dávalo velmi chybné výsledky, viz obrázek 6.3.



Obrázek 6.3: Nasvícení zepředu - světlé pozadí

Při umístění světla dozadu nebyly odlesky již takovým problémem. Ovšem celá fotografie byla tmavší a bubliny zde byly zachyceny se světlejšími středy a tmavšími okraji, což pro člověka není těžké rozpoznat, ovšem pro hranový detektor je to složité, viz obrázek 6.4.



Obrázek 6.4: Nasvícení zezadu - tmavé pozadí

Byly zkoušeny i jiné směry a kombinace nasvícení, například zezadu a přisvícení shora, pouze ze strany, či přímo naproti jedné kameře. Kombinace zezadu i zepředu si vzala od obou variant to špatné. Ovšem prvotní dvě pozice se stále jevily jako nejlepší možné, neboť poskytovaly stejné podmínky oběma kamerám a konzistentní světlo po celé délce.

Zároveň byla zkoušena různá pozadí. Pro nasvícení zepředu se nejvíce osvědčila světlá pozadí, zatímco pro nasvícení zezadu pozadí tmavá.

Nakonec se snažení vydalo dvěma směry. Jedno s nasvícením zezadu a pokusy o upravení softwaru na detekování bublin se špatnými okraji. Druhá snaha eliminace odlesků při nasvícení zepředu.

### Nasvícení zezadu

Při nasvícení zezadu zanikaly výrazné okraje bublin, zejména v jejich horní a dolní části. Detail bubliny nasvícené zezadu je na obrázku 6.5, rovněž zobrazuje nalezené kontury. Za předpokladu dobře detekovaných některých bodů lze použít morfologickou operaci *closing* a to zejména v horizontálním směru pro propojení světlých míst bubliny. Tím se jednotlivé kontury spojí, ovšem pokud se nachází více bublin blízko sebe, dojde k jejich spojení. Dalším nápadem bylo propojení konců kontur s dalším nejbližším koncem kontur. Koncové body byly hledány za předpokladu, že sousedí pouze s jedním pixelem kontury, což nenalezne všechny koncové body, neboť některé končí ve tvaru písmene L, a tedy poslední pixel sousedí s dvěma pixely. Tato podmínka by mohla být upravena, aby nacházela i takovéto body, ovšem i po projení všech

koncových bodů by například k uzavření bubliny na obrázku 6.5 nestačilo. Proto bylo od této snahy upuštěno.



Obrázek 6.5: Vlevo detail bubliny při nasvícení zezadu, vpravo její nalezené hrany

### Nasvícení zepředu

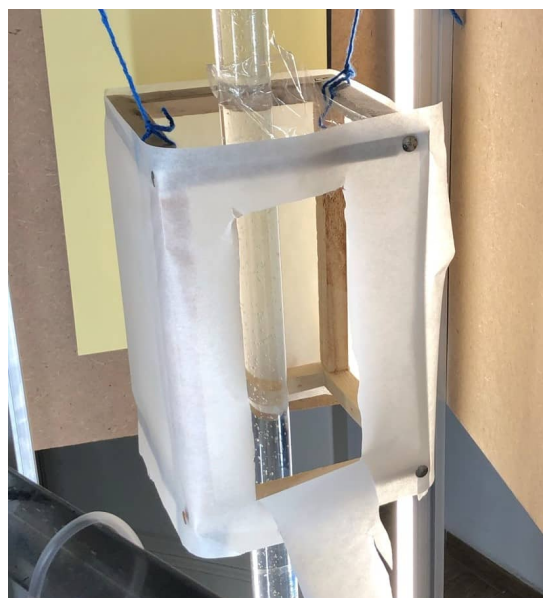
Pokud by bylo dosaženo fotky při nasvícení zepředu bez odlesků, detekce bublin by se výrazně usnadnila. Proto bylo vyzkoušeno mnoho způsobů redukování odlesků.

Byly vyzkoušeny různé fotografické polarizační filtry (viz obrázek 6.6a), ale neměly příliš znatelné výsledky. Lepších výsledků bylo dosaženo při pokusech o zjemnění světla, například umístěním průhledné látky přes LED pásy. Tato úprava odlesky zmírnila, stále ale přetrvávaly.

Článek o fotografování lesklých předmětů [42] byl inspirací pro vytvoření improvizovaného fotografického stanu (viz obrázek 6.6b). Ten ale světlo rozptýlil až příliš a, ač byl obraz zbaven odlesků, okraje bublin se staly naprosto nevýraznými.



(a) Polarizační filtr



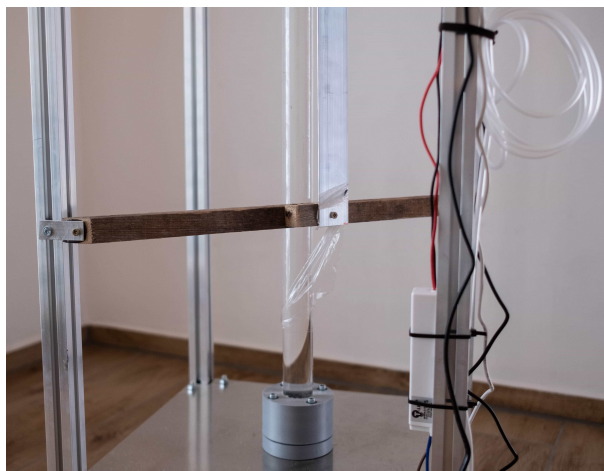
(b) Improvizovaný fotografický stan

Obrázek 6.6: Ukázka pokusů o zlepšení světelných podmínek

Jako nejlepší řešení bylo vyhodnoceno umístění hliníkové pásoviny před trubicí a zabránění



přímému světlu v dopadu na trubici (viz obrázek 6.7), čímž zaniknou odlesky. K nasvícení bublin bylo využito pouze difraktované a odražené světlo, které už není tak ostré. Pro vytvoření opravdu konstantních světelných podmínek byla přes zařízení přehozena deka.



Obrázek 6.7: Blokace přímého světla

Při takto konzistentních světelných podmínkách lze vyfotografovat fotku bez bublin a následně se zapnutým vzduchováním a tyto dvě fotky od sebe odečíst. Výsledkem je obrázek, na kterém jsou pouze bubliny. Nelze však obrázky pouze odečíst, neboť tím by mohly vznikat pixely se zápornou hodnotou. Proto je nutné převést výsledek na absolutní hodnoty. Podrobnější vysvětlení je v kapitole 7.2.2.

### Výsledné nastavení

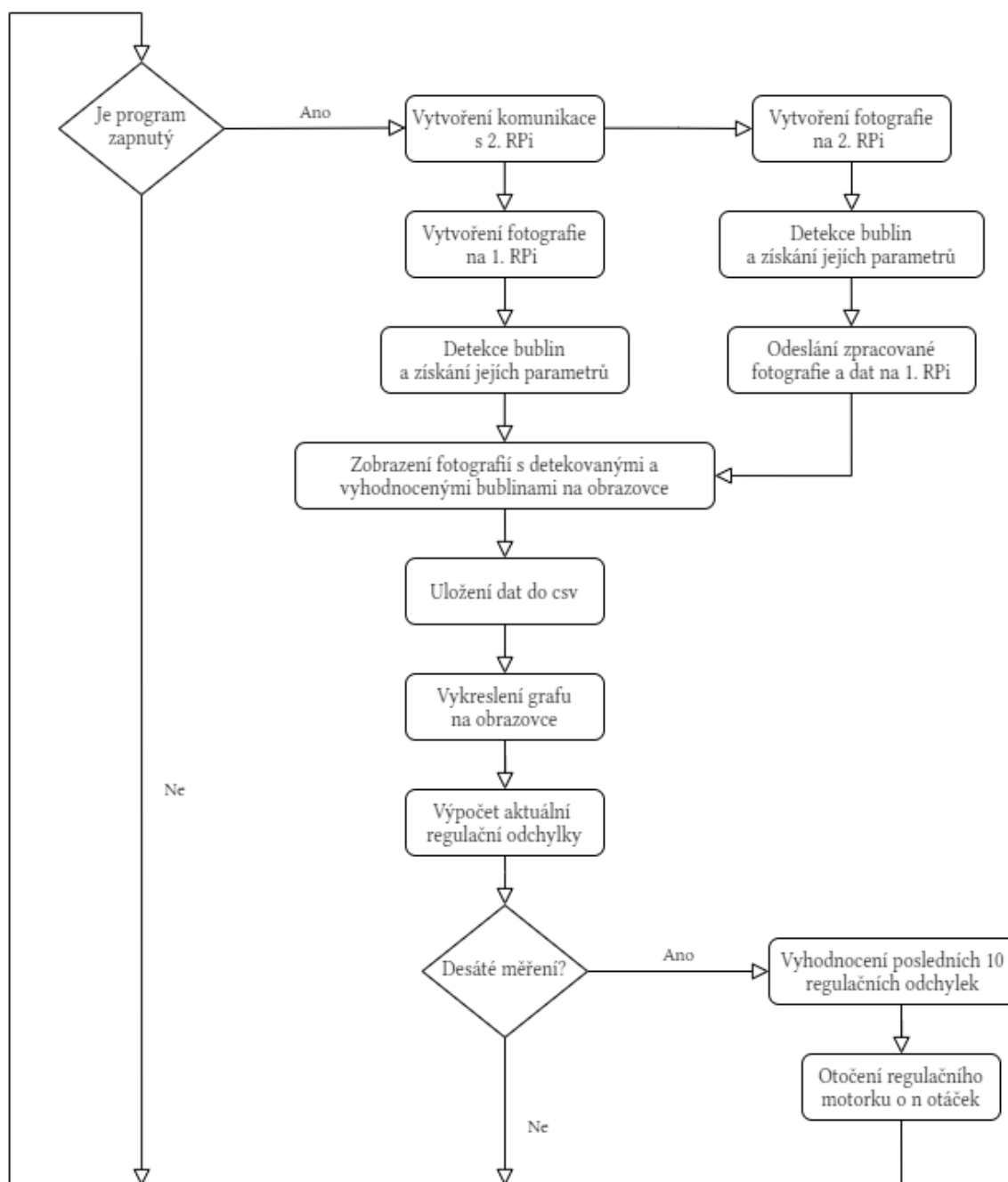
Jako výsledné řešení bylo zvoleno umístění silného světelného zdroje dopředu a jeho odstínění. Fotografickému snímači byly nastaveny tyto parametry:

Tabulka 6.1: Výsledné nastavení snímáče

ISO	600	–
Čas expozice	600	$\mu s$
Clona	f/2.4	–

# 7 | Výsledný program

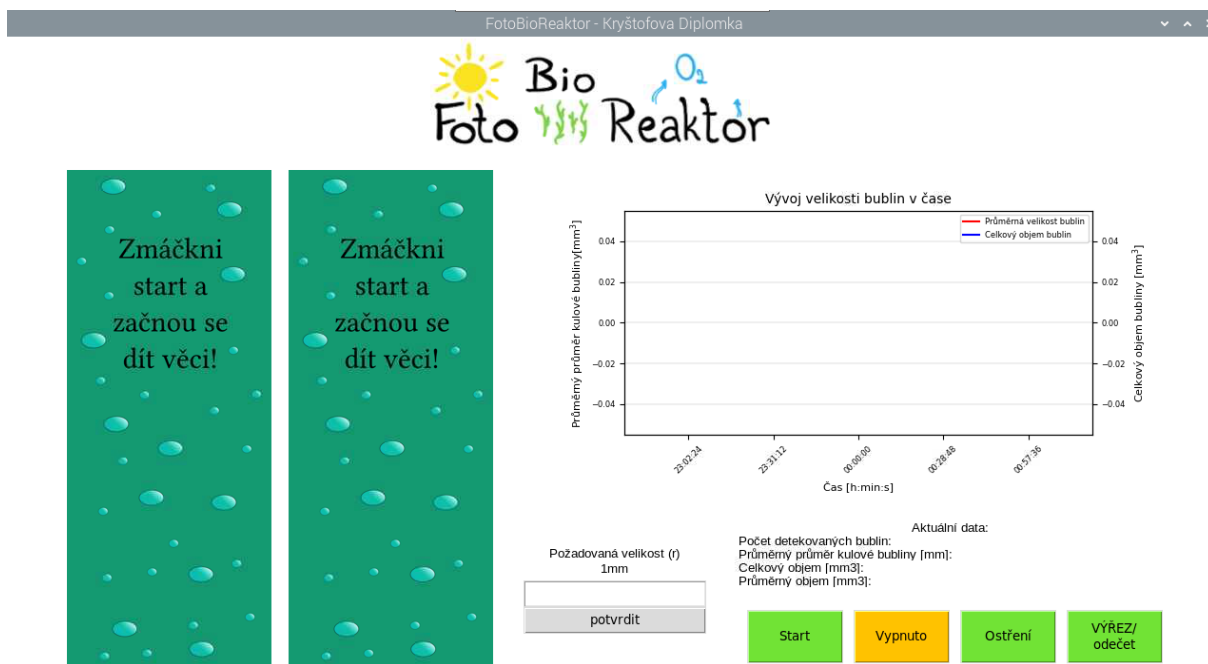
Cílem zařízení je analýza obrazu k získávání dat o vzduchování, sloužící například k regulaci kompresoru. Program tedy na základě obrazové analýzy vyhodnocuje parametry bublin (velikost a množství) a ty následně porovnává s požadovanými hodnotami. Na základě rozdílu těchto hodnot řídí vzduchování. V této kapitole jsou popsány funkce a možnosti vytvořeného programu. Na obrázku 7.1 je zobrazen pracovní diagram programu, kroky jsou následně detailněji popsány i s vysvětlujícím obrázkem. Ten, pokud se jedná o výstup z programu, je pro přehlednost vždy oříznut na poloviční výšku výsledného obrázku programu.



Obrázek 7.1: Zjednodušený pracovní diagram programu

## 7.1 Uživatelské grafické rozhraní

Aby zařízení mohlo být jednoduše ovládáno a zároveň výsledky snadno pozorovány, bylo vytvořeno uživatelské rozhraní pro ovládání zařízení za pomoci knihovny *Tkinter*. Jeho hlavní pracovní prostředí je zobrazeno na obrázku 7.2.



Obrázek 7.2: Hlavní stránka aplikace

V levé části se zobrazují analyzované fotografie bublin, z obou kamer, do kterých jsou vykresleny nalezené elipsy. Barva vykreslených elips odpovídá jejich odlišnosti od požadovaného průměru. Zelenou barvou jsou vykreslovány bubliny, které se vešly do 20% odchylky od požadované hodnoty. Bubliny, jež byly větší, jsou vykreslovány od oranžové po červenou, světle modře až po tmavě modrou jsou zobrazovány bubliny menší. V pravé části je umístěn graf, který zobrazuje průměr a celkový objem bublin v čase. Pod ním jsou zobrazovány aktuální naměřené parametry bublin. Uprostřed je pole, do kterého uživatel zadává požadovaný průměr bublin. Čtyři tlačítka: *Start*, *Stop*, *Ostření* a *Odečet/Výřez*, slouží v daném pořadí ke spuštění hlavního programu, ukončení hlavního programu, vyvolání 10 vteřinového přenosu z kamery, během níž je možné kameru manuálně zaostřit. Poslední tlačítko volí, jak bude fotka zpracována (popsáno v následující kapitole)

## 7.2 Postup programu

V následující části je detailněji popsán průběh programu zobrazený na obrázku 7.1.

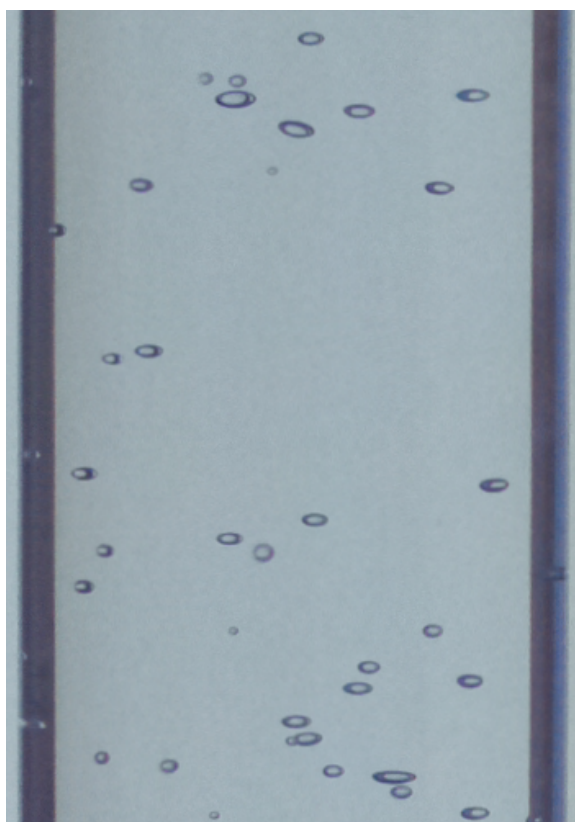
### 7.2.1 Focení

Po stisknutí tlačítka *Start* je odeslán požadavek do druhého Raspberry Pi. Obě zařízení spustí kamery, jež uloží fotografii pod aktuálním časem do příslušné složky. S tímto časem jsou pak spjaty i výsledky měření a vykreslené grafy a uloženy v csv dokumentu. Fotka je následně natočena a ořezána tak, aby zobrazovala pouze požadovanou oblast. V tomto kroku se uplatňuje volba tlačítka *Odečet/Výřez*.

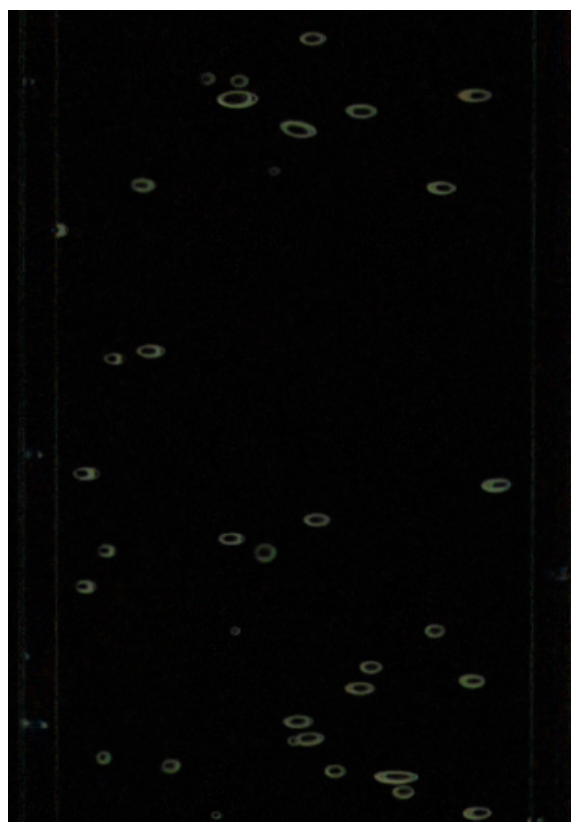
### 7.2.2 Odečet vs výřez

Výřez představuje volbu, kdy se vyřízne z fotografie oblast, která zahrnuje pouze vnitřek trubky - neboli pouze prostřední část obrázku pro odečítací metodu viz 7.4b, o něco menší než je tmavá stěna trubice. Tím zamezíme detekci stěny jako hrany, zároveň zmenšíme pozorovanou oblast, i když pouze nepatrně.

Odečet funguje na jednoduchém principu, kterým je odečtení obrázku bez bublin od obrázku s bublinami, čímž by na obrázku měly zůstat pouze bubliny.



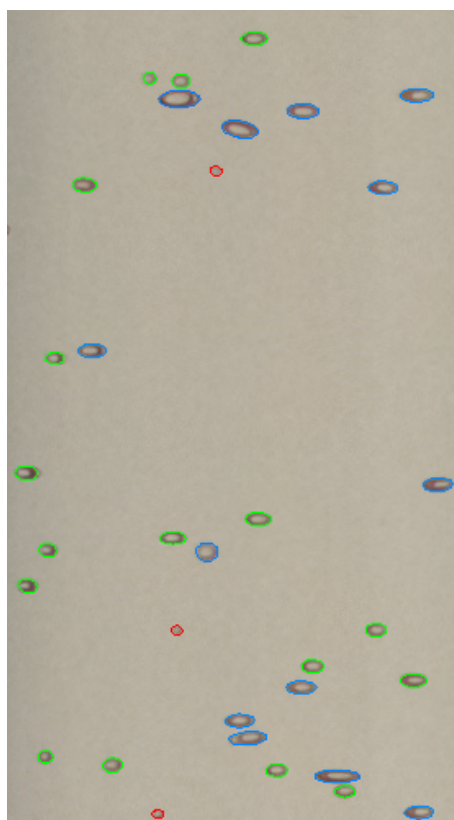
(a) Vstupní fotografie



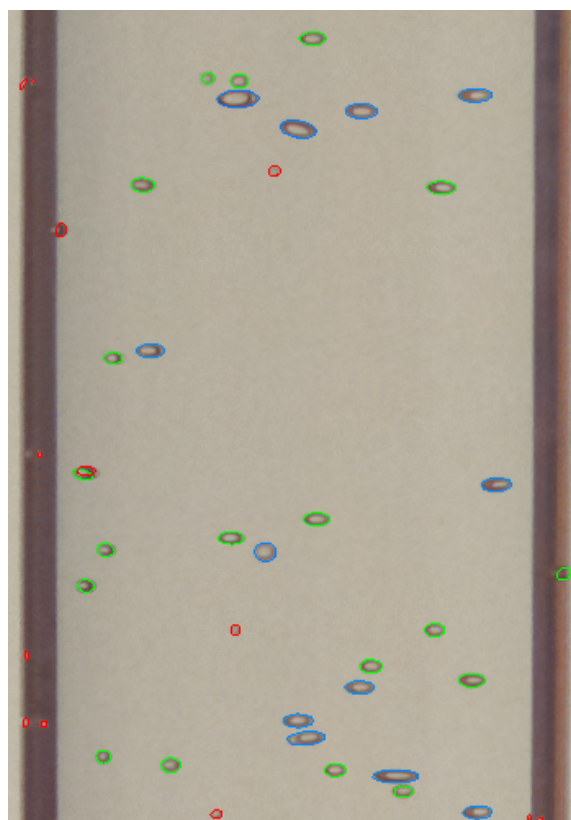
(b) Odečtení obrázku 7.3a od prázdného

Obrázek 7.3: Vstupní obrázky pro výřezovou a odečítací metodu

Díky tomu se dá rozšířit detekování bublin na celou trubici, neboť se při odečítání odstraní pozadí i stěny trubice. A zatímco při neodečítání fotografií je třeba fotografii přesně natočit a vyříznout požadovanou oblast, tato metoda tuto práci nevyžaduje. Na druhou stranu nevýhodou je, že v oblasti u stěny trubice na snímku vytvořeného odečtem jsou detekovány bubliny s velkou chybou. Program následně v obou případech postupuje naprosto stejně, rozdíl je tedy pouze zda jako vstup dostane obrázek 7.3b, nebo výřez z obrázku 7.3a. Výsledky obou metod jsou zobrazeny na obrázku 7.4.



(a) Výsledek výřezové metody



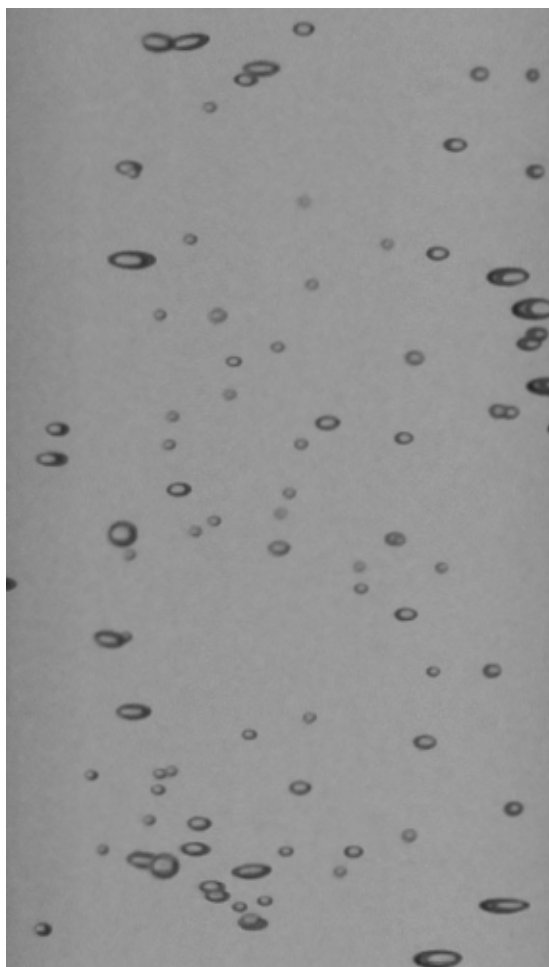
(b) Výsledek odečítací metody

Obrázek 7.4: Výsledky výřezové a odečítací metody

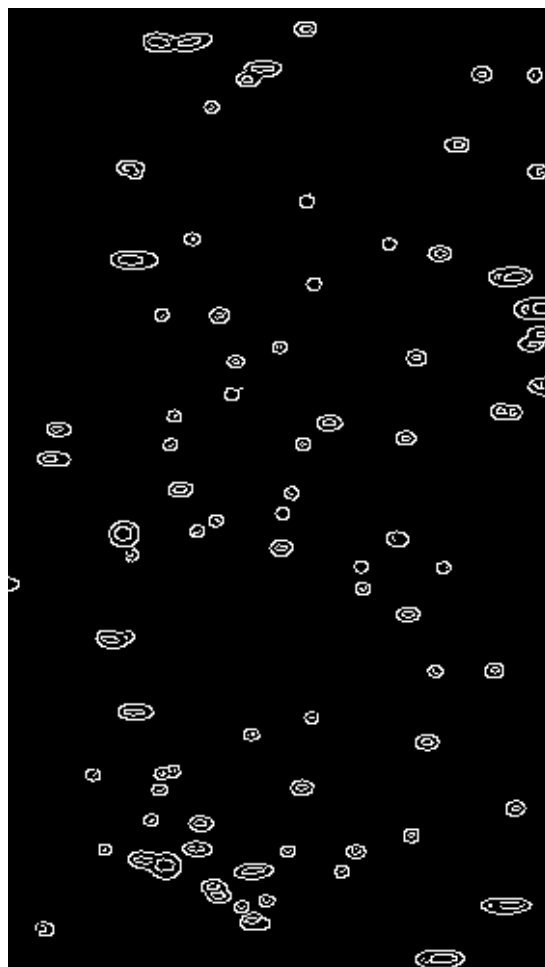
V programu je přednastavena při spuštění výřezová metoda.

### 7.2.3 Detekování elips

Oříznutý obrázek je převeden na odstíny šedé viz obrázek 7.5a a následně je zpracován Cannyho hranovým detektorem. S nižším limitem 25 a vyšším limitem 115 viz obrázek 7.5b.



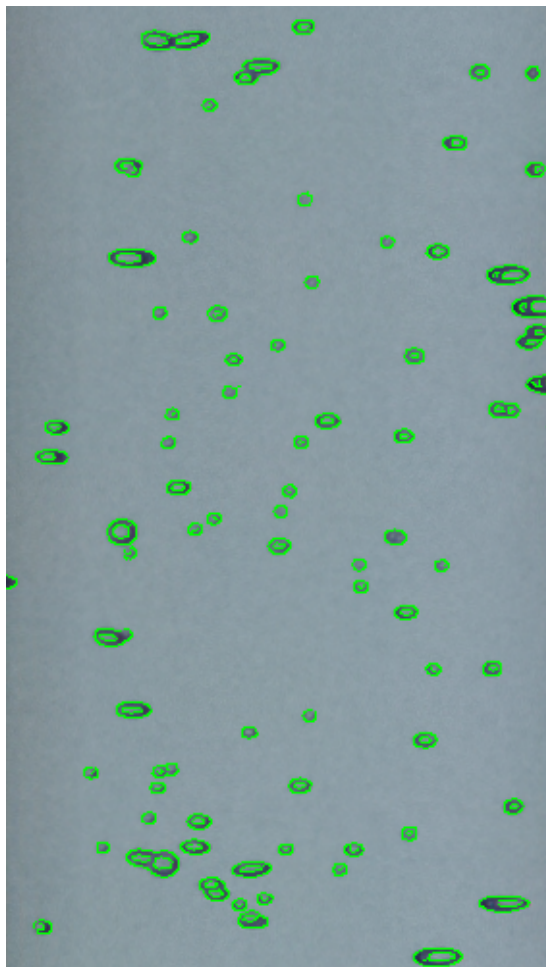
(a) Obrázek v odstínech šedi



(b) Výsledek Cannyho hranového detektoru

Obrázek 7.5: Příprava fotografie a detekce hran

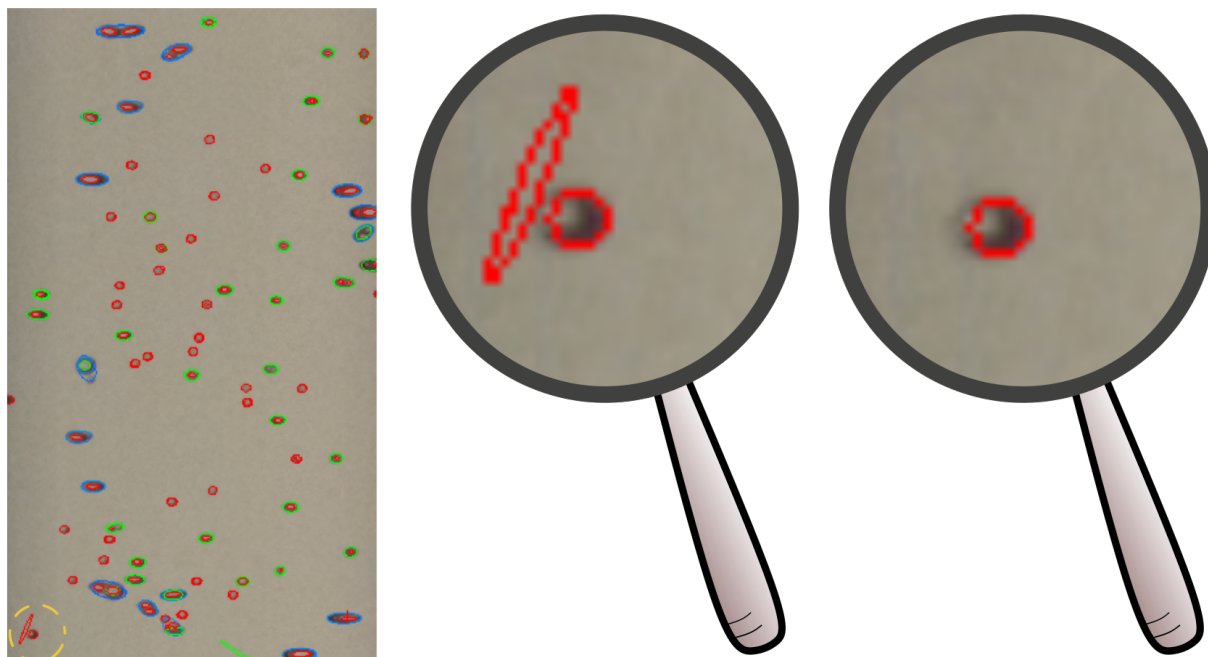
Na výstupu tohoto algoritmu jsou nalezeny kontury za pomoci metody OpenCV *findContours* s parametry *RETR\_TREE* [35]. Kontury jsou zvýrazněny zelenou barvou na obrázku 7.6.



Obrázek 7.6: Kontury nalezených hran

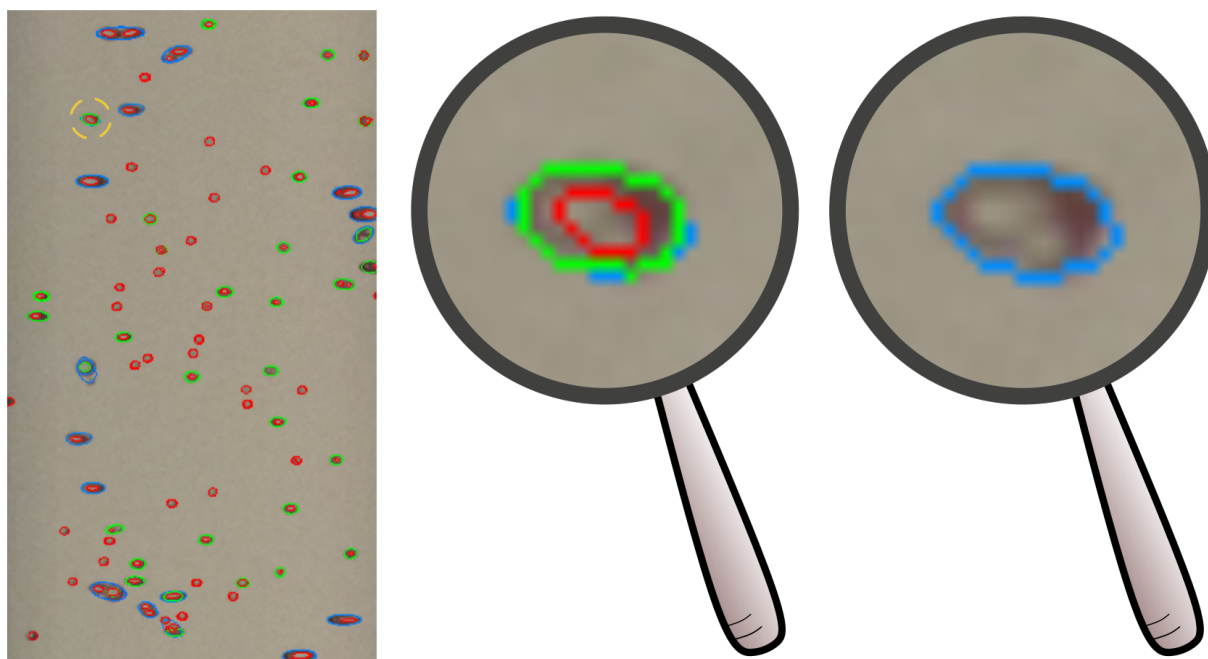
Kontury jsou již shluky bodů, které jdou aproximačně proložit elipsami. Aproximaci jde použít pouze na kontury obsahující více jak čtyři body, proto jsou kontury obsahující méně pixelů než pět smazány. Elipsy, jak již bylo popsáno v podkapitole 5.5.1, je nutno rozlišit na chtěné a přebytečné. Nejprve je tedy použita eliminace podivných elips, která vylučuje elipsy s nekonečnými rozměry (vznikají výjimečně při aproximaci), ovšem častěji slouží k vymazávání elips nad jistou hranicí číselné excentricity elipsy (nastaveno na 0,98). Tyto elipsy jsou většinou výsledkem detekování hrany trubice, odlesků, špíny či šumu. Obrázek 7.7 zobrazuje zleva doprava: snímek před eliminací, detail této fotografie a výsledek detailu po eliminaci.





Obrázek 7.7: Eliminace podivných elips

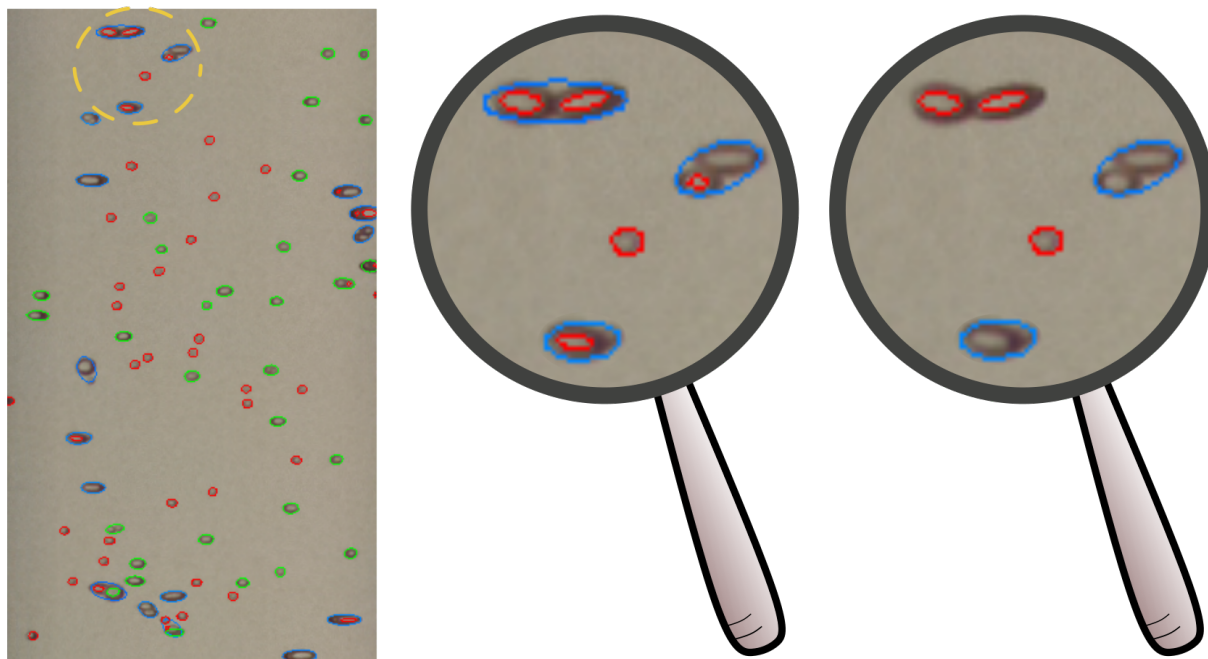
Dále je aplikována eliminace na základě podobných středů (s rádiusem 3 pixely), která je popsána již v podkapitole 5.5.1. Obrázek 7.8 zobrazuje zleva doprava: snímek po eliminaci pouze podivných elips, detail této fotografie a výsledek detailu po obou separacích.



Obrázek 7.8: Eliminace na základě podobných středů

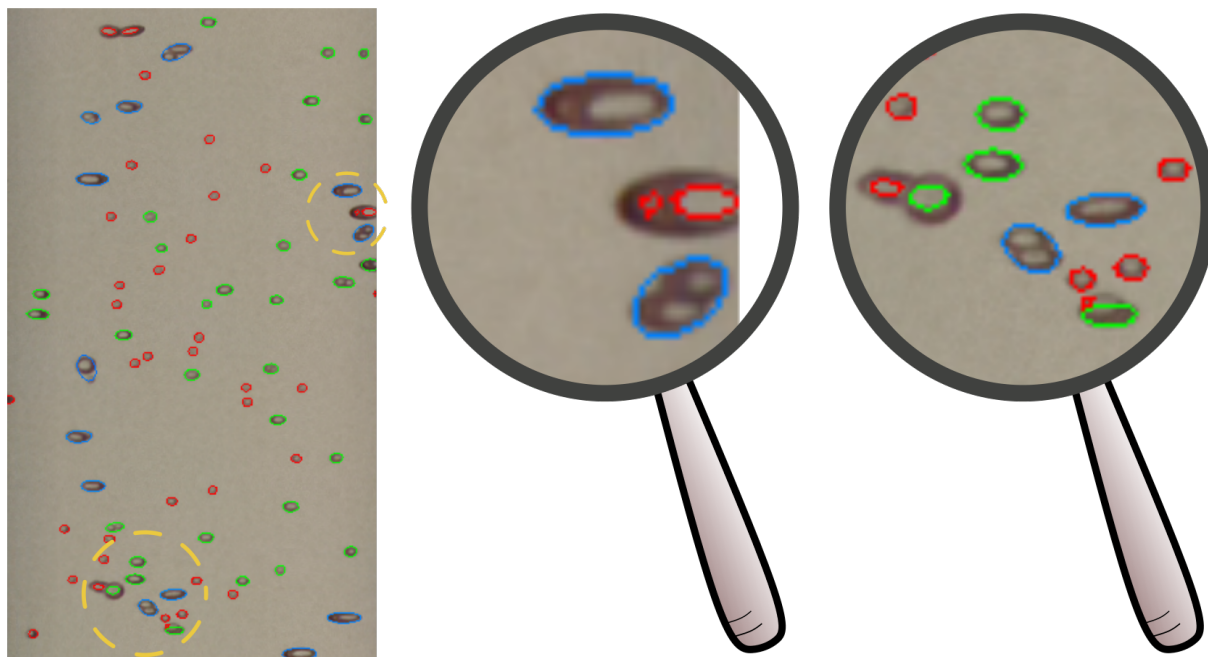
Poslední eliminace, která zjišťuje, zda se středy elips nachází uvnitř jiné elipsy a pokud ano a najde se více než jeden, je vnější elipsa vymazána. To již bylo popsáno v podkapitole 5.5.1. Byla

však ještě přidána podmínka, že pokud je nalezen pouze jeden střed, je považován na světlý odlesk středu bubliny a je eliminována vnitřní elipsa. Toto je zobrazeno na obrázku 7.9.



Obrázek 7.9: Eliminace na základě ohniskových vzdáleností

Na obrázku 7.10 je vlevo zobrazen výsledně zpracovaný obrázek. V detailech jsou přiblíženy nedostatky, které eliminace zanechává. V levém detailu byla detekována dvě světlá místa bubliny, což eliminovalo vnější elipsu. Tento problém by se dal řešit například zvýšením hranice počtu pixelů pro vstup pro proložení elipsami. V obou detailech pak jsou dvě překrývající se bubliny, jež byly detekovány jako jedna. Tomu při této metodě lze jen těžce zabránit. Přesně v těchto případech by si dobře nastavené neuronové sítě vedly lépe.



Obrázek 7.10: Výsledek po eliminaci

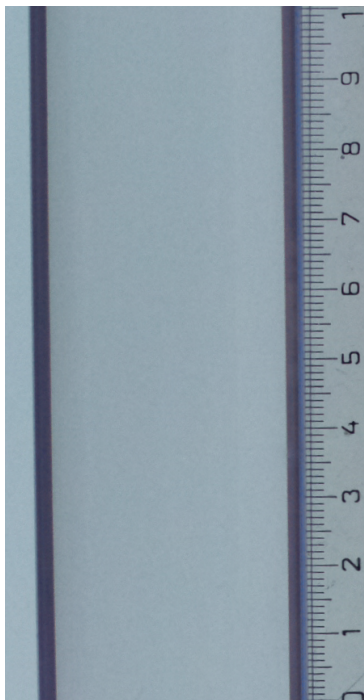
#### 7.2.4 Vykreslení bublin

Výsledkem eliminace je seznam indexů elips, jež prošly danými kritérii. Parametry elips jsou již známy a na základě těchto údajů již lze vyhodnocovat bubliny v trubici. Avšak hodnoty parametrů jsou v pixelech a je nutné je převést na milimetry.

##### Převedení pixelů na milimetry

Pro zjištění reálné velikosti jednoho pixelu byla vyfocena fotografie s přiloženým měřítkem ke středu válce.

Po oříznutí fotografie tak, aby zahrnovala pouze 100 mm měřítka (viz obrázek 7.11), byla zjištěna výška fotografie v pixelech (pravá 862 pixelů, levá 866 pixelů) a dopočítána velikost jednoho pixelu.



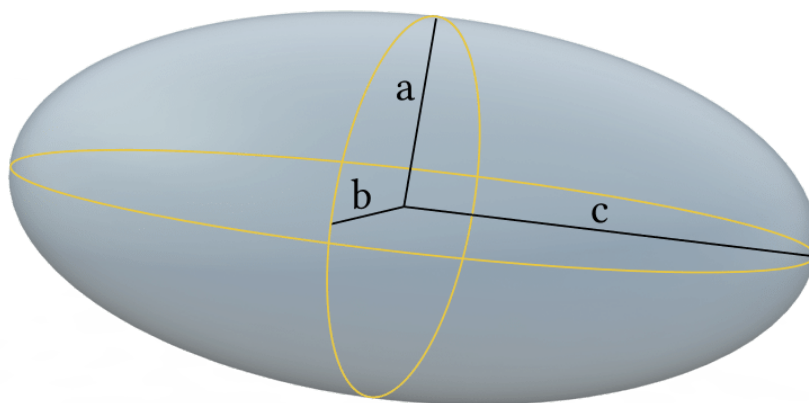
Obrázek 7.11: Měřítka pro převedení bublin

$$pixel = \frac{1}{\text{počet pixelů}} \cdot \text{počet milimetrů} \quad (\text{mm}) \quad (7.1)$$

Pro pravou kameru je pixel roven 0.11601 mm a jeden pixel fotografie z levé kamery odpovídá 0.11547 mm.

### Parametry elipsoidů

Pro každou zachovanou elipsu je vypočítán její objem a průměr. K výpočtu objemu bubliny (obecného elipsoidu) by bylo ideální znát velikost jejích všech poloos. Z tohoto důvodu byla snaha dosáhnout dvou fotografií vyfocených ve stejném čase z různých úhlů. A následně o propojení těchto dvou snímků za pomoci epipolární geometrie tak, aby bylo možné identifikovat tu samou bublinu na obou fotografiích. Následně by se osa  $a$  průměrovala a osa  $b$  by se brala z jednoho snímku a osa  $c$  z druhého. Toto se bohužel nepovedlo zrealizovat jak z důvodu nedostatečné synchronizace časů fotek, tak nedostatku výrazných objektů pro epipolární geometrii. Epipolární geometrii jednoduše popisuje tento článek od K. Říhy a P. Hůjky [43]. Ve výsledném programu tedy považujeme bublinu za rotační elipsoid kolem její kratší osy a hodnoty z obou fotografií jsou průměrovány. Na obrázku 7.12 je zobrazen elipsoid, jehož osa  $b$  i  $c$  se rovnají.



Obrázek 7.12: Rotační elipsoid

Elipsy jsou následně vykreslovány do ořezané fotografie barvou, jež reprezentuje odlišnost mezi požadovanou velikostí bublin a kulovým průměrem adekvátním k obsahu elipsoidu. Zelenou barvou jsou vykreslovány bubliny, které se vešly do 20% odchylky od požadované hodnoty. Bubliny, jež byly větší, jsou vykreslovány od oranžové po červenou, světle modře až po tmavě modrou jsou zobrazovány bubliny menší.

### Vyhodnocovací metody

V tomto kroku se vypočítávají reprezentační hodnoty bublin dané fotografie, které slouží k regulaci a jsou vykreslovány do grafu. Pouhý aritmetický průměr je příliš zatížen chybami analýzy bublin. Neboť například překrývající bubliny mohou být vyhodnoceny jako bubliny příliš malé oproti realitě (protože je vyhodnocena například vnitřní hrana bubliny), nebo zároveň detekovány jako jedna příliš velká. Modus a medián nejsou k tomuto náchylné, na druhou stranu při měření často vznikaly bubliny, které by se daly rozdělit do dvou velikostních skupin. Zde by medián i modus mohly dávat nevypovídající hodnoty. Neboť častěji je přítomen větší počet menších bublin a střední a velké bubliny by se v regulaci vůbec neprojevily. Přičemž tyto bubliny mohou obsahovat celkově větší objem vzduchu proudící do trubice.

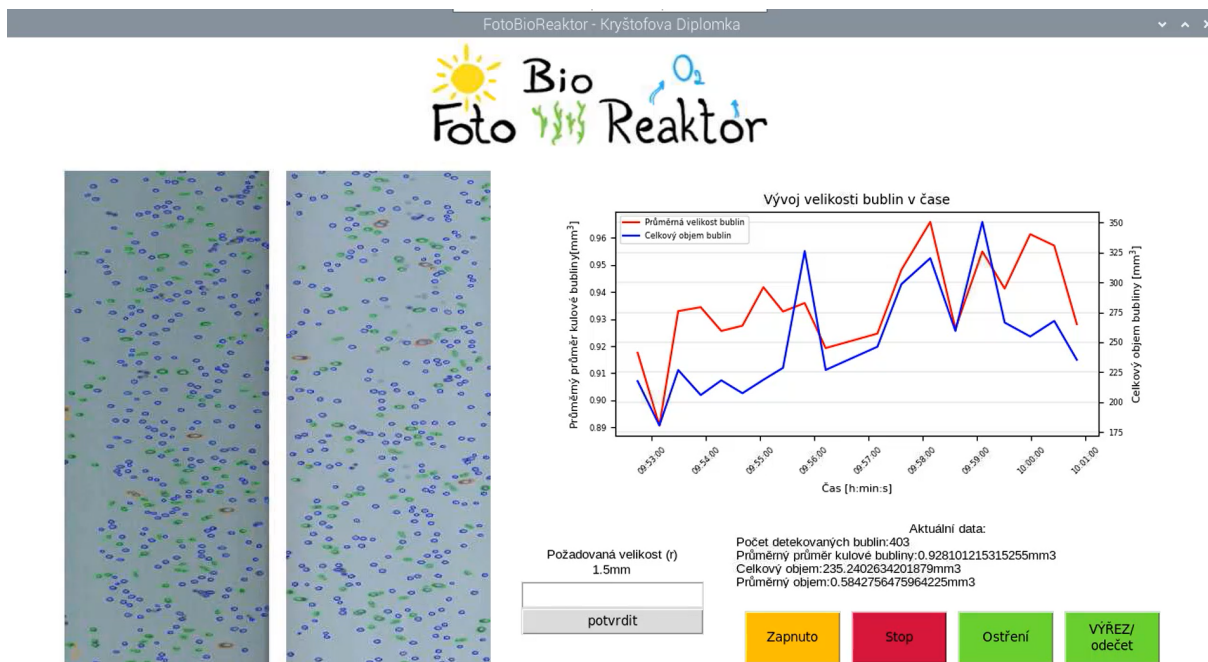
Nakonec tedy byla zvolena metoda aritmetického průměru s vyloučením extrémních hodnot. Kdy se vylučuje vrchních i spodních 5 % hodnot a ze zbytku se vyhodnocují: průměrný průměr kulové bubliny a průměrný objem. Celkový objem a počet bublin se vyhodnocují i z extrémních hodnot.

### 7.2.5 Zobrazování a uchovávání dat

Oba vyhodnocené obrázky se zobrazí na hlavní stránce uživatelského rozhraní. Dopočítá se regulační odchylka a všechny vypočítané hodnoty se uloží do csv souboru s časem vytvoření snímku. Na základě těchto dat se vykreslí vytvoří/aktualizuje graf, který zobrazuje posledních dvacet měření. V tomto kroku začíná nové vlákno programu a ten znovu žádá o další fotku, během toho ovšem stále dobíhá předešlá smyčka programu, která má za úkol regulaci vzduchování. Čas mezi snímky závisí na množství bublin. V případě, kdy je vzduchování vypnuté, je tento čas okolo 10 sekund, při zapnutém vzduchování je čas jednoho cyklu 30 až 90 sekund.



Čas nejvíce prodlužuje eliminace elips, méně výkonému Raspberry Pi navíc eliminace trvá až dvakrát déle. V případě použití pouze jedné kamery a výkonnějšího Raspberry Pi, dosahuje perioda 10 až 30 sekund i při zapnutém vzduchování, neboť se zrychlí výpočetní čas a neprobíhá komunikace mezi zařízeními. Na obrázku 7.13 je znázorněný snímek obrazovky při zapnutém programu.



Obrázek 7.13: Snímek obrazovky zařízení při chodu

## 7.2.6 Regulace

Výkon vzduchovacího kompresoru se řídí PID regulátorem na základě dat z analýzy obrazu, které PID regulátoru udávají průměrnou velikost bublin a požadovanou hodnotu. Rozdílem těchto dvou hodnot je regulační odchylka. Z regulační odchylky se po každém měření vypočítá akční veličina, která se po deseti měřeních vyhodnotí mediánem a jeho hodnota je odeslána do motorku. Akční veličina se neposílá krokovému motorku (který ovládá regulaci kompresoru) po každém měření, protože průtok ani velikost bublin nejsou konstantní ani při stálém provozu a obrazová analýza do tohoto vnáší další možný rozptyl v konzistentnosti. Není tedy třeba, aby se motorek otáčel tam a zpět a raději se řídil delšími časovými trendy.

### PID regulace

PID regulace a její různé varianty jsou nejrozšířenějším způsobem pro kontrolu a ovládání dynamických systému. Základem těchto regulací je vyhodnocování odchylky  $e$  od požadované hodnoty. Jednotlivé složky PID regulátoru reagují a vyhodnocují tuto odchylku různými způsoby. Výsledky jednotlivých složek se sčítají a výsledkem je akční veličina  $u$ . [44] PID regulace má tři složky:

1. **Proporcionální** - určuje reakci regulátoru na velikost regulační odchylky a je jejím prostým zesilovačem. Ovšem při použití pouze proporcionálního regulátoru nebude regulační odchylka zcela odstraněna.
2. **Integrační** - umožňuje odstranění regulační odchylky tím, že určuje reakci regulátoru na dobu trvání odchylky.
3. **Derivační** - určuje reakci regulátoru na rychlost změny odchylky a tím zrychluje regulaci.

Jednotlivým složkám se dá přiřadit různá váha pomocí proměnných  $K_p$  pro proporcionální složku,  $K_i$  pro integrační složku a  $K_d$  pro derivační složku. Rovnice PID regulátoru je uvedena ve vztahu 7.2.

$$u = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7.2)$$

Alternativním tvarem rovnice PID regulátoru, který se v praxi vyskytuje častěji, je vztah 7.5, kde jsou parametry  $K_i$  a  $K_d$  nahrazeny časovými konstantami za pomoci vztahů 7.3 a 7.4. [44]

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} \quad (7.3)$$

$$K_d = K_p \cdot \tau_d \quad (7.4)$$

$$u = K_p \cdot \left( e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(\tau) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (7.5)$$

Kde:

$u$	akční veličina	–
$K_p$	zesílení proporcionální složky	–
$K_d$	zesílení derivační složky	–
$K_i$	zesílení integrační složky	–
$e$	odchylka	–
$\tau_d$	derivační časová konstanta	–
$\tau_i$	integrační časová konstanta	–

V této práci bylo využito prvního tvaru rovnice, jelikož snaha o hledání ideálních parametrů dle různých metod by nejspíše byla zbytečná. Protože na základě obrazové analýzy vyhodnocovat velikost bublin a za pomoci tohoto údaje regulovat průtok není nejlepším řešením, (ačkoliv průtok částečně velikost bublin ovlivňuje), neboť průtok vzduchu jenž by se měl k řasám dostat je většinou dán a může být změřen snadněji průtokoměrem. Využití tohoto zařízení by naopak mohlo být vyhodnocování kvality vzduchovacích elementů, upozorňování na jejich zanesení řasou, či poruchu. Proto v praktickém využití by se průtok vzduchu spíše reguloval na základě požadovaného množství. I když, pokud by průtok odpovídal, avšak při příliš velkých bublinách, mohlo by se stát, že lepších podmínek pro růst řas by se dosáhlo menšími bublinami i na úkor snížení průtoku.

Při požadavku na velikost bublin, které zařízení ani při plném výkonu vzduchování nedosáhne, se motorek regulace stále snaží zvýšit výkon a integrační složka stále roste. Bylo by proto vhodné mít nějaký senzor na detekci maximálního výkonu vzduchování, či mít počítadlo otáček motorku, kde by se aktuální počet otáček v jednom směru uchovával v nějakém souboru a porovnával se s maximálním počtem otáček. Ani jedno z těchto řešení nebylo aplikováno. Byl pouze ohraničen rozsah možných požadovaných velikostí bublin od průměru 0,5 mm po 2 mm.



## 8 | Diskuze

Postavit a připravit software pro toto zařízení se ukázalo jako časově náročný úkol. Zejména co se týče softwarové části, je stále mnoho možností k vylepšení. Program občas nezvládá měnění požadavku na velikost bublin v průběhu měření, výřez fotografie by mohl být automatizován dle detekce hrany trubice, graf i obrázky by mohly být interaktivní, vytvořeno informativní textové pole o průběhu programu a našlo by se mnoho dalších možností jak vylepšit uživatelské prostředí. Z hlediska kvality detekce bublin by byly dalšími vhodnými kroky: zlepšení světelných podmínek, kalibrace kamer, zlepšení synchronizace obou kamer (případně vyzkoušení varianty se zrcadly), či ideálně vyzkoušení detekce za pomoci neuronových sítí a porovnání výsledků. Vhodné by také bylo projít větší množství analyzovaných fotografií a přidat další vylepšení do detekce a eliminace bublin. Dále vyzkoušení funkčnosti zařízení za přítomnosti řas v trubici a zapojení průtokoměru do sestavy a porovnání jím naměřených hodnot s hodnotami o celkovém průtoku vyhodnocenými sestaveným zařízením.

Sestavené zařízení není vhodné pro regulaci průtoku vzduchu, spíše by mohlo zastávat roli vyhodnocovače kvalit vzduchovacích elementů, či jako optická bezpečnostní kontrola poruch.

Pokud by zařízení mělo být postaveno znovu a sloužit jako analyzátor bublin ve fotobioreaktoru s řasami, autor práce by doporučil použití pouze jednoho Raspberry Pi a jednu kameru, neboť provést 3D analýzu bublin je opravdu náročné a bez ní nemá použití dvou kamer velké opodstatnění, naopak přináší komplikace s komunikací mezi zařízeními a zvyšuje čas mezi jednotlivými analýzami (fotografiemi). Z toho důvodu je možnost využití pouze hlavního Raspberry Pi a jeho kamery zabudované v programu (není však zabudovaná v uživatelském rozhraní). Dále by se pokusil použít k obrazové analýze neuronové sítě, jež by mohly dosahovat vyšší rychlosti analýzy a nebyly by tak náchylné ke světelným odleskům. Vhodné by také bylo zmenšení celé konstrukce pro snadnější manipulaci a zvýšení tuhosti ramen pro upevnění kamer. Poslední radou by bylo změnění konceptu regulace vzduchování.

## 9 | Závěr

Mikrořasy se dají považovat za užitečné malé továrny, jež využívají sluneční energii k přeměně anorganických sloučenin na biomasu. Tu lze využít jako udržitelný zdroj biopaliv, potravy a farmaceutických produktů. Mikrořasy mohou být zároveň užitečné pro zmírňování hladiny oxidu uhličitého a při čištění odpadních vod. Na rozdíl od suchozemských rostlin nepotřebují úrodnou půdu a mají vyšší rychlost růstu. Ovšem ačkoliv mají mikrořasy slibnou budoucnost, je stále potřeba překonat množství překážek pro jejich větší rozšíření v komerční sféře.

V praktické části práce bylo navrženo, zkonstruováno a naprogramováno zařízení, jež dokáže analyzovat bubliny fotobioreaktoru a na základě získaných dat řídit jeho vzduchování. K vytvoření programu byl použit programovací jazyk Python a k analýze fotografií byla využita knihovna OpenCV. V práci je postup podrobněji popsán a jednotlivé kroky programu vysvětleny na výstupních obrázcích. Zařízení je plně funkční, má ovšem své limity, které jsou v závěru práce zmíněny a zároveň je shrnuto několik bodů, jak by mohlo být zařízení vylepšeno, nebo případně přepracováno.

Výsledkem práce je tedy zařízení, jež dokáže na základě obrazové analýzy, konkrétněji detekci hran, detekovat bubliny v trubici. Fotografie pro analýzu jsou získávány dvěma kamerami, umístěných v úhlu  $90^\circ$  a namířených na trubici. Program vyhodnocuje množství, velikost, průměrný objem a celkový objem bublin na fotografii. Tyto informace se zobrazují na obrazovce zařízení společně s fotografiemi jednotlivých měření, na nichž jsou jednotlivé bubliny vyznačeny barvami reprezentující jejich velikost. Dále je zde vykreslován graf popisující průběh velikosti a celkového objemu bublin v čase. Data z měření se využívají k regulaci vzduchovacího motoru za pomoci PID regulátoru, který reguluje průtok dle požadovaného průměru bublin. Data se také ukládají do csv souboru pro případnou pozdější analýzu.

# Literatura

1. ROSER, Max. Future Population Growth. *Our World in Data* [online]. 2013 [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/future-population-growth>.
2. *Human society under urgent threat from loss of Earth's natural life* [online]. 2019 [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <http://www.theguardian.com/environment/2019/may/06/human-society-under-urgent-threat-loss-earth-natural-life-un-report>.
3. *Emissions by Sector* [online] [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>.
4. SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2018/ 2001 - ze dne 11. prosince 2018 - o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů, s. 128.
5. MASOJÍDEK, Jiří; LHOTSKÝ, Richard; KOPECKY, Jiri; PRASIL, Ondrej. *Mikrořasy - Solární Továrna v Jedné Buňce Microalgae - Solar Factory in a Single Cell*. 2016.
6. CAMACHO, Franciele; MACEDO, Angela; MALCATA, Francisco. Potential Industrial Applications and Commercialization of Microalgae in the Functional Food and Feed Industries: A Short Review. *Marine Drugs* [online]. 2019, roč. 17, č. 6 [cit. 2020-12-30]. ISSN 1660-3397. Dostupné z DOI: 10.3390/md17060312.
7. *Advanced Biofuels* [online]. Elsevier, 2019 [cit. 2021-04-12]. ISBN 978-0-08-102791-2. Dostupné z DOI: 10.1016/C2018-0-00461-2.
8. UDAYAN, A.; ARUMUGAM, M.; PANDEY, A. Chapter 4 - Nutraceuticals From Algae and Cyanobacteria. In: RASTOGI, Rajesh Prasad; MADAMWAR, Datta; PANDEY, Ashok (ed.). *Algal Green Chemistry* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2017, s. 65–89 [cit. 2021-04-13]. ISBN 978-0-444-63784-0. Dostupné z DOI: 10.1016/B978-0-444-63784-0.00004-7.
9. KHAN, Muhammad Imran; SHIN, Jin; KIM, Jong-Deog. The Promising Future of Microalgae: Current Status, Challenges, and Optimization of a Sustainable and Renewable Industry for Biofuels, Feed, and Other Products. *Microbial Cell Factories*. 2018, roč. 17. Dostupné z DOI: 10.1186/s12934-018-0879-x.
10. PULZ, Otto; GROSS, Wolfgang. Valuable Products from Biotechnology of Microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology* [online]. 2004, roč. 65, č. 6, s. 635–648 [cit. 2021-04-24]. ISSN 1432-0614. Dostupné z DOI: 10.1007/s00253-004-1647-x.
11. RADMER, Richard J. Algal Diversity and Commercial Algal Products. *BioScience*. 1996, roč. 46, č. 4, s. 263–270. ISSN 0006-3568. Dostupné z DOI: 10.2307/1312833.
12. Biodiesel from Microalgae. *Biotechnology Advances* [online]. 2007, roč. 25, č. 3, s. 294–306 [cit. 2021-04-30]. ISSN 0734-9750. Dostupné z DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.02.001.

13. HU, Qiang; SOMMERFELD, Milton; JARVIS, Eric; GHIRARDI, Maria; POSEWITZ, Matthew; SEIBERT, Michael; DARZINS, Al. Microalgal Triacylglycerols as Feedstocks for Biofuel Production: Perspectives and Advances. *The Plant Journal: For Cell and Molecular Biology*. 2008, roč. 54, č. 4, s. 621–639. ISSN 1365-313X. Dostupné z DOI: 10.1111/j.1365-313X.2008.03492.x.
14. LAURENS, Lieve. *State of Technology Review - Algae Bioenergy*. 2017. Dostupné z DOI: 10.13140/RG.2.2.11770.90560.
15. PANDEY, Ashok. *Biofuels from Algae*. Ve spol. s LEE, Duu-Jong; CHISTI, Yusuf; SOCCOL, Carlos R. Oxford: Elsevier, 2013. ISBN 978-0-444-59582-9. Dostupné z DOI: 10.1016/C2012-0-00170-6.
16. AMINI KHOEYI, Zahra; SEYFABADI, Jafar; RAMEZANPOUR, Zohreh. Effect of Light Intensity and Photoperiod on Biomass and Fatty Acid Composition of the Microalgae, *Chlorella Vulgaris*. *Aquaculture International* [online]. 2012, roč. 20, č. 1, s. 41–49 [cit. 2021-04-16]. ISSN 1573-143X. Dostupné z DOI: 10.1007/s10499-011-9440-1.
17. SINGH, S. P.; SINGH, Priyanka. Effect of Temperature and Light on the Growth of Algae Species: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, roč. 50, s. 431–444 [cit. 2021-04-16]. ISSN 1364-0321. Dostupné z DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.024.
18. COVARRUBIAS, Yadiralia; CANTORAL-URIZA, Enrique A.; CASAS-FLORES, J. Sergio; GARCÍA-MEZA, J. Viridiana. Thermophile Mats of Microalgae Growing on the Woody Structure of a Cooling Tower of a Thermoelectric Power Plant in Central Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad* [online]. 2016, roč. 87, č. 2, s. 277–287 [cit. 2021-04-16]. ISSN 1870-3453. Dostupné z DOI: 10.1016/j.rmb.2016.04.001.
19. SHEN, Ying; YUAN, W.; PEI, Z.J.; WU, Q.; MAO, E. Microalgae Mass Production Methods. *Transactions of the ASABE*. 2009, roč. 52, s. 1275–1287. Dostupné z DOI: 10.13031/2013.27771.
20. ALGAEWORLDNEWS. *Biotech Company Built a 230 Kilometers Vertical Photobioreactor in Just 10 Months* [online]. 2018 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://news.algaeworld.org/2018/10/biotech-company-built-a-230-kilometers-vertical-photobioreactor-in-just-10-months/>.
21. TRIPATHI, Manoj Kumar; SAHU, Kirti Chandra; GOVINDARAJAN, Rama. Dynamics of an Initially Spherical Bubble Rising in Quiescent Liquid. *Nature Communications* [online]. 2015, roč. 6, č. 1, s. 6268 [cit. 2021-03-03]. ISSN 2041-1723. Dostupné z DOI: 10.1038/ncomms7268.
22. LU, Yuzhen; YOUNG, Sierra. A Survey of Public Datasets for Computer Vision Tasks in Precision Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2020, roč. 178, s. 105760 [cit. 2021-03-14]. ISSN 0168-1699. Dostupné z DOI: 10.1016/j.compag.2020.105760.
23. MATHIALAGAN, Prabhakaran; CHIDAMBARANATHAN, Malathy. Computer Vision Techniques for Upper Aero-Digestive Tract Tumor Grading Classification – Addressing Pathological Challenges. *Pattern Recognition Letters* [online]. 2021, roč. 144, s. 42–53 [cit. 2021-03-14]. ISSN 0167-8655. Dostupné z DOI: 10.1016/j.patrec.2021.01.002.
24. POLETAEV, Igor; TOKAREV, Mikhail P.; PERVUNIN, Konstantin S. Bubble Patterns Recognition Using Neural Networks: Application to the Analysis of a Two-Phase Bubbly Jet. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2020, roč. 126, s. 103194 [cit. 2021-01-01]. ISSN 0301-9322. Dostupné z DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103194.

25. JORDT-SEDLAZECK, Anne; ZELENKA, Claudius; SCHNEIDER VON DEIMLING, Jens; KOCH, Reinhard; KÖSER, Kevin. The Bubble Box: Towards an Automated Visual Sensor for 3D Analysis and Characterization of Marine Gas Release Sites. *Sensors*. 2015, roč. 15, s. 30716–30735. Dostupné z DOI: 10.3390/s151229825.
26. 3.3. Scikit-Image: Zpracování Obrazu - Skripta Scipy [online] [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://scipy-lectures.org/packages/scikit-image/index.html#scikit-image-and-the-scipy-ecosystem>.
27. HU, Yaoyu. *Bubble Detection by Using openCV | Yaoyu Hu's Personal Site* [online] [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <http://www.huyaoyu.com/technical/2017/12/13/bubble-detection-by-using-opencv.html>.
28. *OpenCV: Introduction to OpenCV-Python Tutorials* [online] [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: [https://docs.opencv.org/master/d0/de3/tutorial\\_py\\_intro.html](https://docs.opencv.org/master/d0/de3/tutorial_py_intro.html).
29. *OpenCV: Color Conversions* [online] [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: [https://docs.opencv.org/3.4/de/d25/imgproc\\_color\\_conversions.html](https://docs.opencv.org/3.4/de/d25/imgproc_color_conversions.html).
30. *Image Processing in Python | DataCamp* [online] [cit. 2020-08-03]. Dostupné z: <https://learn.datacamp.com/courses/image-processing-in-python>.
31. *OpenCV: Miscellaneous Image Transformations* [online] [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: [https://docs.opencv.org/3.4/d7/d1b/group\\_\\_imgproc\\_\\_misc.html#gab87810a476a9cb660435a4cd7871c9eb](https://docs.opencv.org/3.4/d7/d1b/group__imgproc__misc.html#gab87810a476a9cb660435a4cd7871c9eb).
32. *OpenCV: Smoothing Images* [online] [cit. 2020-08-03]. Dostupné z: [https://docs.opencv.org/master/d4/d13/tutorial\\_py\\_filtering.html](https://docs.opencv.org/master/d4/d13/tutorial_py_filtering.html).
33. CANNY, J. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986, roč. PAMI-8, č. 6, s. 679–698. ISSN 1939-3539. Dostupné z DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
34. *OpenCV: Canny Edge Detection* [online] [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: [https://docs.opencv.org/master/da/d22/tutorial\\_py\\_canny.html](https://docs.opencv.org/master/da/d22/tutorial_py_canny.html).
35. *OpenCV: Structural Analysis and Shape Descriptors* [online] [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: [https://docs.opencv.org/3.4/d3/dc0/group\\_\\_imgproc\\_\\_shape.html#gaf259efaad93098103d6c27b9e4900ffa](https://docs.opencv.org/3.4/d3/dc0/group__imgproc__shape.html#gaf259efaad93098103d6c27b9e4900ffa).
36. *Raspistill - Raspberry Pi Documentation* [online] [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/camera/raspicam/raspistill.md>.
37. *Picamera — Picamera 1.10 Documentation* [online] [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://picamera.readthedocs.io/en/release-1.10/index.html>.
38. *SSH (Secure Shell) Home Page* [online] [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.ssh.com/ssh/>.
39. *Socket — Low-Level Networking Interface — Python 3.9.2 Documentation* [online] [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/socket.html>.
40. *3. Basic Recipes — Picamera 1.13 Documentation* [online] [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://picamera.readthedocs.io/en/release-1.13/recipes1.html?highlight=speed#capturing-in-low-light>.
41. *Pronikněte Do Tajů Expozice: Expoziční Trojúhelník* [online] [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://www.milujemefotografii.cz/proniknete-do-taju-expozice-expozicni-trojuhelnik>.

42. *Jak Na Fotografování Skleněných a Lesklých Produktů* [online] [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.milujemefotografii.cz/jak-na-fotografovani-sklenenych-a-lesklych-produktu>.
43. ŘÍHA, Kamil. *Epipolární geometrie* [online] [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05017/index.html>.
44. PAZ, Robert. *The Design of the PID Controller*. 2001.

# Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Význam	Jednotka
$a$	parametr Gaussovy funkce značící hodnotu jejího vrcholu	-
$B$	modrý kanál fotografie	-
$e$	odchylka od požadované hodnoty	-
$E_0$	Eötvösovo číslo	-
$G$	zelený kanál fotografie	-
$G_a$	Galileovo číslo	-
$G_v$	výsledný gradient obrázku	-
$G_x$	gradient ve směru osy x	-
$G_y$	gradient ve směru osy y	-
$K_d$	zesílení derivační složky	-
$K_i$	zesílení integrační složky	-
$K_p$	zesílení proporcionální složky	-
$\mu$	parametr Gaussovy funkce sloužící k posunu funkce	-
$\mu_r$	viskozita	$\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$
$R$	červený kanál fotografie	-
$\rho_r$	hustota	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\sigma$	parametr Gaussovy funkce funkce určující její šířku	-
$\tau_d$	derivační časová konstanta	-
$\tau_i$	integrační časová konstanta	-
$u$	akční veličina	-
$Y$	výsledná hodnota pixelu	-

# **Seznam příloh**

**Příloha A: Seznam nakoupeného materiálu**



# Seznam tabulek

6.1	Výsledné nastavení snímače . . . . .	39
-----	--------------------------------------	----



# Seznam obrázků

3.1	Zjednodušené schéma . . . . .	11
3.2	Tvary bublin v závislosti na $Eo$ a $Ga$ čísla [21] . . . . .	12
4.1	Zjednodušený model zařízení . . . . .	14
4.2	Model příruby . . . . .	15
4.3	Příruha . . . . .	16
4.4	Uchycení kamery . . . . .	16
4.5	Uchycení regulačního motorku . . . . .	17
4.6	Sestavené zařízení . . . . .	18
5.1	Ukázka zapsání obrázku v matici . . . . .	20
5.2	Ukázka zapsání obrázku v matici . . . . .	20
5.3	Ukázka převedení z RGB do odstínů šedi . . . . .	22
5.4	Prahování za pomoci knihovny Scikit-image . . . . .	23
5.5	$5 \times 5$ matice reprezentující booleovský obrázek . . . . .	24
5.6	Strukturní element . . . . .	24
5.7	Různé pozice strukturního elementu . . . . .	25
5.8	Výsledný obrázek po dilataci . . . . .	25
5.9	Ukázka funkce hysterézního prahování . . . . .	27
5.10	Testovací elipsy . . . . .	28
5.11	Výsledek detekce elips bez jejich filtrování . . . . .	28
5.12	Detail osamocených elipsy . . . . .	29
5.13	Ponechání pouze externích kontur . . . . .	30

5.14	Eliminace na základě podobných středů elips . . . . .	31
5.15	Výsledek po závěrečné eliminaci . . . . .	31
6.1	Expoziční trojúhelník [41] . . . . .	34
6.2	Schematický pohled shora na umístění světél . . . . .	36
6.3	Nasvícení zepředu - světlé pozadí . . . . .	36
6.4	Nasvícení zezadu - tmavé pozadí . . . . .	37
6.5	Vlevo detail bubliny při nasvícení zezadu, vpravo její nalezené hrany . . . . .	38
6.6	Ukázka pokusů o zlepšení světelných podmínek . . . . .	38
6.7	Blokace přímého světla . . . . .	39
7.1	Zjednodušený pracovní diagram programu . . . . .	41
7.2	Hlavní stránka aplikace . . . . .	42
7.3	Vstupní obrázky pro výřezovou a odečítací metodu . . . . .	43
7.4	Výsledky výřezové a odečítací metody . . . . .	44
7.5	Příprava fotografie a detekce hran . . . . .	45
7.6	Kontury nalezených hran . . . . .	46
7.7	Eliminace podivných elips . . . . .	47
7.8	Eliminace na základě podobných středů . . . . .	47
7.9	Eliminace na základě ohniskových vzdáleností . . . . .	48
7.10	Výsledek po eliminaci . . . . .	49
7.11	Měřítka pro převedení bublin . . . . .	50
7.12	Rotační elipsoid . . . . .	51
7.13	Snímek obrazovky zařízení při chodu . . . . .	52